

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
AMBIENTAL DE MATERIAIS CONSTRUTIVOS: APLICAÇÃO
EM BLOCO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

DANILLO DE ALMEIDA E SILVA

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO LUNA DE MELO

COORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE DE A. F. PEREIRA

TESE DE DOUTORADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BRASÍLIA/DF: MARÇO/2023
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
AMBIENTAL DE MATERIAIS CONSTRUTIVOS: APLICAÇÃO
EM BLOCO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO**

DANILLO DE ALMEIDA E SILVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ARQUITETURA E URBANISMO.

APROVADA POR:

Prof. Carlos Eduardo Luna de Melo (PPG-FAU/UnB)

(Orientador)

Prof. Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira (PPG-ENC/UnB)

(Coorientador)

Prof. Caio Frederico e Silva (PPG-FAU/UnB)

(Examinador Interno)

Prof. Lucas Rosse Caldas (UFRJ)

(Examinador Externo)

Profa. Elaine Aparecida da Silva (UFPI)

(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 29 DE MARÇO DE 2023

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, D. A (2022). Metodologia para avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos: aplicação em bloco de pavimento intertravado de concreto. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 234p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Danillo de Almeida e Silva

TÍTULO: Metodologia para avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos: Aplicação em bloco de pavimento intertravado de concreto.

GRAU: Doutor ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese de Doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Danillo de Almeida e Silva
706 SUL, RES. LUMAN, AL 02 HM 20, LT 02, BL B, AP 603B
CEP 77022372 PALMAS – TO
e-mail: arq.danillo@gmail.com

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sebastião e Rozalina, que, pela resistência e bravura, puderam me dar possibilidades de ser hoje o que sou.

Em especial à minha mãe, uma grande e sábia mulher, te amarei eternamente.

Ao meu anjo e grande amor da minha vida, Dra. Liane Sousa, que constantemente me apoia e me auxilia em tudo o que faço, e aos meus grandes irmãos Bruno e Blainer, grandes amigos.

Aos meus primos, tios, tias, avós e a todos os parentes que me proporcionaram uma família perfeita.

Hoje, eu realizo o que planejei ontem, amanhã presenciarei o que planejo agora.

“A humildade é a maior virtude que o homem pode ter”

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Carlos Eduardo Luma de Melo e Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, pela orientação, ensinamentos e motivação constante para a realização deste trabalho;

A todos os professores do PPG-FAU, pela importante convivência e ensinamentos transmitidos;

À CAPES, pelo suporte financeiro durante o período de pesquisa do Doutorado.

RESUMO

Diante da finitude das matérias-primas básicas para a indústria da construção civil e no contexto da problemática ocasionada pelo aquecimento global, a incorporação de aspectos de sustentabilidade em seus componentes auxilia e fornece informações para análise e seleção de materiais. Nesta questão ambiental para a sustentabilidade das edificações, o processo de seleção de materiais desponta, atualmente, como uma premissa necessária para a sustentabilidade do ambiente construído. Nesta tese, partiu-se da premissa que propor um ambiente construído sustentável implica, principalmente, em uma articulação mais próxima dos materiais, baseando-se em exigências preestabelecidas, em coerência com novas demandas tecnológicas e ecológicas. Nesse contexto, o propósito principal da pesquisa é desenvolver uma metodologia para auxiliar a seleção e o desenvolvimento de materiais construtivos, que seja prática e acessível ao conhecimento teórico das partes interessadas. A estrutura metodológica tem como cerne o Pensamento do Ciclo de Vida (PCV), no qual são mensurados e avaliados indicadores de sustentabilidade como quantidade de emissões poluentes e energia incorporada. O objetivo da metodologia é fornecer uma ferramenta prática para análise do desempenho ambiental de materiais construtivos. A metodologia para avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos, denominada Metodologia ADAMC, identifica, direciona, avalia e apresenta melhorias ambientais, considerando indicadores de sustentabilidade preestabelecidos. A metodologia estabelece o *Ida*, índice de desempenho ambiental, e propõe uma escala gráfica, para determinar o nível da performance ambiental que varia de 0% a 100%. A metodologia ADAMC classifica a performance ambiental em muito baixa, baixa, média, alta ou avançada. Sua estrutura é constituída por 7 etapas sequenciais e interdependentes, e foi concebida com o propósito de buscar oportunidades de melhorias ambientais no componente ou material da construção civil. Como material de estudo, foi adotado o bloco de pavimento intertravado de concreto para a aplicação da metodologia. A proposta de melhorias ambientais no bloco de pavimento apresentou uma redução de 51,29% ou cerca de 9,48 kgCO₂/m², para as emissões poluentes CO₂ e uma redução de 27,98% de energia incorporada (EI), ou cerca de 31,26 MJ/m². As melhorias ambientais de serem realizadas são alcançadas nos níveis apresentados.

Palavras-chave: ACV; Construção Civil; Desempenho Ambiental; Performance Ambiental; Níveis de performance.

ABSTRACT

Given the finite availability of basic raw materials for the construction industry and in the context of the problems caused by global warming, the incorporation of sustainability aspects in its components helps and provides information for analysis and selection of materials. In this environmental issue for the sustainability of buildings, the process of material selection currently emerges as a necessary premise for the sustainability of the built environment. In this thesis, we started from the premise that proposing a sustainable built environment implies, mainly, a closer articulation of the materials, based on pre-established requirements, in coherence with new technological and ecological demands. In this context, the main purpose of the research is to develop a methodology to assist the selection and development of building materials, which is practical and accessible to the theoretical knowledge of stakeholders. The methodological framework has Life Cycle Thinking (LCC) at its core, in which sustainability indicators such as the amount of pollutant emissions and embodied energy are measured and evaluated. The goal of the methodology is to provide a practical tool for analyzing the environmental performance of building materials. The methodology for evaluating the environmental performance of construction materials, called the ADAMC Methodology, identifies, directs, evaluates, and presents environmental improvements, considering pre-established sustainability indicators. The methodology establishes the *Ida*, environmental performance index, and proposes a graphic scale to determine the level of environmental performance that ranges from 0% to 100%. The ADAMC methodology classifies environmental performance into very low, low, medium, high, or advanced. Its structure consists of 7 sequential and interdependent steps, and was conceived with the purpose of seeking opportunities for environmental improvements in the building component or material. As a study material, the concrete interlocked paving block was adopted for the application of the methodology. The proposed environmental improvements in the paving block showed a 51,29% reduction, or about 9,48 kgCO₂/m², for CO₂ pollutant emissions and a 27,98% reduction in embodied energy (EI), or about 31,26 MJ/m². The environmental improvements to be realized are achieved at the levels shown.

Keywords: LCA; Construction; Environmental Performance; Environmental Performance; Performance levels.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA	4
1.2	OBJETIVOS	5
1.2.1	Objetivo geral	5
1.2.2	Objetivos específicos	5
1.3	ESTRUTURA DA TESE	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	ECONOMIA CIRCULAR	8
2.1.1	Economia Circular na Construção Civil.....	10
2.2	METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO	12
2.2.1	Metodologia BREEAM (<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>)	13
2.2.2	Metodologia BEPAC (<i>Building Environmental Performance Assessment Criteria</i>) 15	
2.2.3	Metodologia LEED (<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>)	17
2.2.4	Ferramenta SBTool (<i>Sustainable Building Tool</i>).....	18
2.2.5	Metodologia NABERS (<i>National Australian Built Environment Rating System</i>) 22	
2.2.6	Metodologia CASBEE (<i>Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency</i>)	24
2.2.7	Metodologia DGNG (<i>German Sustainable Building Council</i>)	27
2.2.8	Metodologia AQUA (Alta Qualidade Ambiental)	29
2.2.9	Ferramenta ASUS (Sistemas de Avaliação de Sustentabilidade).....	31
2.2.10	<i>European Committee for Standardization EN 15804:2013+A2:2019 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products</i>	37
2.2.11	Metodologia ISMAS (Instrumento para a Seleção de Materiais Mais Sustentáveis).....	39
2.2.12	Ferramenta SIDAC (Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção).....	44
2.2.13	Análise Comparativa das Metodologias	48
2.3	INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE NO AMBIENTE CONSTRUÍDO	52
2.3.1	A sustentabilidade e seu viés econômico	55
2.4	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)	56
2.4.1	ACV na Construção Civil.....	57
2.4.2	Metodologia da ACV	58
2.4.3	Definição do objetivo e escopo da ACV	59
2.4.3.1	Objetivo da ACV	59
2.4.3.2	Escopo da ACV	60
2.4.3.3	Unidade funcional da ACV	62
2.4.4	Inventário do ciclo de vida (ICV).....	62
2.4.4.1	Coleta de dados.....	63
2.4.4.2	Procedimentos de cálculo	64
2.4.5	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	64
2.4.5.1	Métodos de impacto aplicados à modelagem ambiental	66

2.4.5.2	Categorias de impactos ambientais	67
2.4.6	Interpretação da ACV	68
2.5	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÕES DE CO₂ NA CONSTRUÇÃO CIVIL	68
2.5.1	Mecanismos para a compensação do dióxido de carbono (CO ₂)	72
2.5.2	Sequestro de carbono na construção civil.....	74
2.6	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	75
2.7	DECLARAÇÃO AMBIENTAL DE PRODUTO - DAP.....	78
2.7.1	DAP - Tipo III	80
2.7.2	Importância da rotulagem ambiental	81
2.8	PAVIMENTO INTERTRAVADO	81
2.8.1	Histórico da origem e aplicação do pavimento intertravado	81
2.8.2	Processo de fabricação e execução de pavimento intertravado de concreto ..	84
2.8.3	Representatividade histórica.....	86
2.8.4	Evolução tecnológica.....	87
2.9	UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO EM CONCRETO	87
2.9.1	Reciclagem do agregado reciclado de concreto	89
2.9.2	Bloco de Pavimento Intertravado de Concreto com Agregado Reciclado	90
2.10	TIPOS DE CIMENTO PRODUZIDOS NO BRASIL	93
2.10.1	Substituição do clínquer	93
2.10.2	Cimento LC ³ - <i>Limestone Calcined Clay Cement</i>	95
2.10.3	Benefícios do cimento LC ³ no âmbito ambiental	96
3	METODOLOGIA ADAMC	97
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	97
3.2	ESTRUTURA DA METODOLOGIA ADAMC.....	98
3.2.1	Etapa 1 - Definir o objeto de estudo e seus indicadores de sustentabilidade .	99
3.2.2	Etapa 2 - Avaliar o ciclo de vida	100
3.2.3	Etapa 3 - Estabelecer o <i>benchmark</i>	101
3.2.4	Etapa 4 - Direcionar ações para melhorias ambientais.....	102
3.2.5	Etapa 5 - Determinar o fator de desempenho	103
3.2.6	Etapa 6 - Realizar análise de risco.....	105
3.2.7	Etapa 7 - Classificar o de desempenho ambiental	109
3.3	COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA ADAMC EM RELAÇÃO AS METODOLOGIAS E FERRAMENTAS ANALISADAS.....	113
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ADAMC AO BLOCO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO.....	115
4.1	ETAPA 1 - DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO E SEUS INDICADORES DE SUSTENTABIIDADE.....	115
4.2	ETAPA 2 - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO BLOCO DE PAVIMENTO	117
4.2.1	Avaliação do ciclo de vida do bloco de pavimento	118
4.2.1.1	Escopo e unidade funcional.....	118
4.2.1.2	Inventário do ciclo de vida do bloco de pavimento.....	120
4.2.1.3	Ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto	131
4.3	ETAPA 3 - ESTABELECIMENTO DO <i>BENCHMARK</i>.....	139
4.4	ETAPA 4 - DIRECIONAMENTO DAS AÇÕES PARA MELHORIAS AMBIENTAIS	143
4.5	ETAPA 5 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DE DESEMPENHO	146
4.6	ETAPA 6 – REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DE RISCO.....	150

4.6.1	Identificação e avaliação dos riscos.....	151
4.7	ETAPA 7 – CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL ..	162
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	164
5.1	MELHORIA AMBIENTAL NO BLOCO DE PAVIMENTO	
	INTERTRAVADO DE CONCRETO.....	164
5.1.1	Índice de desempenho ambiental (<i>Ida</i>).....	164
5.1.2	Performance ambiental.....	166
5.2	REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	167
5.2.1	Máxima eficácia ambiental.....	168
5.2.2	Carbono equivalente CO ₂ eq	174
5.3	COMPENSAÇÃO AMBIENTAL.....	175
5.3.1	Compensação das emissões de dióxido de carbono CO ₂	175
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
	FUTUROS.....	179
6.1	CONSIDERAÇÕES	179
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	182
	ANEXO A - FORMULÁRIO APLICADO PARA LEVANTAMENTO	
	DE DADOS PARA A PESQUISA	211
	ANEXO B - LEVANTAMENTO DO INVENTÁRIO	215
	ANEXO C - LEVANTAMENTO PARA AÇÕES DE MELHORIAS	
	AMBIENTAIS, SELEÇÃO DE MATERIAIS	220

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo de vida do agregado miúdo na construção civil	8
Figura 2 Definição da economia circular	9
Figura 3 Estrutura do BEPAC	16
Figura 4 Esquema de ponderação do SBTool	20
Figura 5 classificações NABERS	23
Figura 6 Estrutura conceitual do CASBEE	25
Figura 7 Diagrama de eficiência ambiental do edifício (<i>BEE</i>).....	26
Figura 8 Ferramenta ASUS web.....	36
Figura 9 Principais etapas do ciclo de vida de uma edificação de acordo com a EN 15804 (CEN, 2012)	38
Figura 10 Escala de graduação para a avaliação de cada critério no ISMAS	40
Figura 11 Marcas de referência do critério 1	41
Figura 12 Parâmetros conceituais adotados para definição dos pontos atribuídos.....	41
Figura 13 Pontos atribuídos aos critérios com base nos parâmetros adotados.....	42
Figura 14 Escala de ajuste dos pontos atribuídos para os pesos.....	42
Figura 15 Possíveis resultados do índice de sustentabilidade propostos pelo ISMAS...	43
Figura 16 Representação visual do índice de sustentabilidade do material pelo ISMAS	43
Figura 17 O número de folhas representa o grau de sustentabilidade atingido na Ferramenta Verde	44
Figura 18 Etapas do ciclo de vida de uma edificação, considerando os módulos de informação padronizados pela norma europeia EN 15978 (DIN, 2012). A primeira versão do SIDAC apresenta indicadores agregados para as etapas A1-A3 - Produto (do berço ao portão).....	45
Figura 19 Representação esquemática simplificada do sistema de produto de uma edificação, do berço ao túmulo, com o sistema de primeiro plano (foreground), o sistema de segundo plano (background), os fluxos de produto e fluxos elementares	47
Figura 20 Estrutura da avaliação do ciclo de vida ACV	59
Figura 21 Procedimentos simplificados para execução do inventário do ciclo de vida .	62
Figura 22 Produção e consumo sustentáveis	80
Figura 23 Construção de uma estrada romana.....	82
Figura 24 Rua de uma cidade romana	82
Figura 25 Visão de uma rua romana nos dias de hoje, Pompeia em Nápoles, Itália.....	83
Figura 26 Máquina vibro-compressora	83
Figura 27 Estrutura típica da aplicação dos pavimentos intertravados com pavimento intertravado de concreto	85
Figura 28 Estrutura da Metodologia ADAMC	98
Figura 29 Ciclo de vida de componentes construtivos	100
Figura 30 Cenários para avaliação do ciclo de vida	101
Figura 31 Definição de seleção de estudo de melhorias ambientais	103
Figura 32 Estrutura Analítica de Risco.....	105
Figura 33 Performance Ambiental	110
Figura 34 Escala do índice de desempenho ambiental para a determinação do nível de performance ambiental	110
Figura 35 Níveis de performance ambiental proposto pela Metodologia ADAMC	111
Figura 36 Fluxograma da Metodologia ADAMC	112
Figura 37 Bloco de pavimento intertravado de concreto.....	116

Figura 38 Porcentagem de cada material na composição bloco de pavimento intertravado de concreto em massa.....	116
Figura 39 Materiais integrantes do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto	117
Figura 40 Escopo do estudo da ACVb	118
Figura 41 Ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto	121
Figura 42 Etapas avaliadas na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto	128
Figura 43 Bloco de pavimento intertravado de concreto master 6,0 cm x 11,0 cm x 21,6 cm	130
Figura 44 Etapas avaliadas na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao portão.....	131
Figura 45 Quantidade de emissões de kgCO ₂ /m ² e MJ/m ² em cada material na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao portão	132
Figura 46 Etapas avaliadas para o cenário do berço ao túmulo.....	134
Figura 47 Quantidade de emissões de kgCO ₂ /m ² e MJ/m ² em cada material na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao túmulo	135
Figura 48 Etapas avaliadas na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao berço	136
Figura 49 Quantidade de emissões de kgCO ₂ /m ² e MJ/m ² em cada material na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao berço.....	138
Figura 50 Estudo comparativo dos cenários berço ao berço, berço ao portão e berço ao túmulo.....	139
Figura 51 Emissões CO ₂ e energia incorporada no ciclo de ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto	140
Figura 52 Porcentagem do impacto ambiental que cada componente representa no ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto	141
Figura 53 Perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto.....	142
Figura 54 Estrutura analítica dos riscos EAR.....	151
Figura 55 Análise comparativa do Ida para os blocos com materiais substituintes	165
Figura 56 Interações entre os materiais substituintes para a definição dos blocos de análise	168
Figura 57 Comparativo da quantidade de emissões de CO ₂ dos blocos 1, 2, 3, 4 e referência	170
Figura 58 Comparativo da quantidade de energia incorporada dos blocos 1, 2, 3, 4 e referência	171
Figura 59 Porcentagem de emissões de kgCO ₂ /m ² dos blocos 1, 2, 3 e 4 em relação ao bloco referência	171
Figura 60 Porcentagem de energia incorporada MJ/m ² dos blocos 1, 2, 3 e 4 em relação ao bloco referência.....	172
Figura 61 Dióxido de carbono equivalente (CO ₂ eq) dos blocos	174
Figura 62 Análise comparativa da produção de bloco por plantio de árvores	177
Figura 63 Análise comparativa das emissões CO ₂ por produção de blocos.....	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Categoria avaliada pelo método BREEAM.....	14
Tabela 2 Referências de classificação BREEAM.....	15
Tabela 3 Exigências classificativas do indicador BEE e níveis de classificação do sistema de avaliação CASBEE.....	26
Tabela 4 Níveis de classificação e respectivos requisitos exigências do sistema de avaliação DGNB.....	29
Tabela 5 Categorias avaliadas pelo AQUA.....	30
Tabela 6 Nível global do certificado HQE.....	31
Tabela 7 Estrutura e hierarquia da ferramenta ASUS.....	32
Tabela 8 Estrutura de apresentação dos critérios.....	34
Tabela 9 Escala de graduação do desempenho final.....	35
Tabela 10 Categorias/critérios da metodologia ISMAS.....	40
Tabela 11 Metodologias para avaliação do desempenho ambiental de edifícios.....	49
Tabela 12 Normas ABNT NBR ISO 14000 relacionadas com a ACV.....	58
Tabela 13 Métodos de AICV analisados.....	65
Tabela 14 Especificações de uso do para agregado reciclado oriundos de RCD em diferentes países.....	87
Tabela 15 Pesquisas realizadas com agregado reciclado para produção do pavimento intertravado de concreto.....	91
Tabela 16 Análise <i>swot</i> do material substituinte.....	107
Tabela 17 Grau de risco associado.....	107
Tabela 18 Matriz de risco.....	108
Tabela 19 Níveis de performance ambiental proposto pela Metodologia ADAMC....	111
Tabela 20 Indicadores de sustentabilidade.....	117
Tabela 21 Conversão da energia elétrica, Diesel em MJ e emissões CO ₂	122
Tabela 22 Transportes T1 a T6 - distância - Emissão kgCO ₂ /L e MJ/L.....	125
Tabela 23 Quantidade de emissão kgCO ₂ e MJ para a extração do pedrisco e pó de pedra.....	126
Tabela 24 Quantidade de emissão kgCO ₂ e MJ para a extração da areia lavada.....	126
Tabela 25 Quantidade de energia incorporada no beneficiamento da rocha (m ³).....	127
Tabela 26 Quantidade de emissão de CO ₂ e energia incorporada EI na produção de energia elétrica para produção do agregado natural (m ³).....	127
Tabela 27 Fatores de emissão de CO ₂ e energia incorporada EI para os materiais empregados na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto.....	129
Tabela 28 Quantidade material para a produção de uma und e m ²	130
Tabela 29 Inventário para o cenário berço ao portão.....	132
Tabela 30 Quantidade de materiais e emissões para produção do bloco de pavimento intertravado de concreto por m ² para o cenário berço ao túmulo.....	134
Tabela 31 Energia incorporada EI e emissão de CO ₂ na produção do agregado reciclado.....	137
Tabela 32 Quantidade de materiais e emissões para produção do bloco de pavimento intertravado de concreto por m ² para o cenário berço ao berço.....	137
Tabela 33 Desempenho de referência (<i>benchmark</i>).....	142
Tabela 34 Emissão de CO ₂ e energia incorporada dos materiais de referência.....	143
Tabela 35 Material substituinte para areia fina natural.....	144
Tabela 36 Materiais substituintes para o pedrisco.....	144
Tabela 37 Materiais substituintes para o cimento CPV.....	144
Tabela 38 Materiais substituintes e fornecedores.....	144

Tabela 39 Emissão de CO ₂ e energia incorporada dos agregados levantados como substituintes	145
Tabela 40 Emissão de CO ₂ e energia incorporada para os cimentos.....	146
Tabela 41 Composição do Bloco - A _{rcd}	146
Tabela 42 Composição do Bloco - A _{bt}	147
Tabela 43 Composição do Bloco - P _{sb}	147
Tabela 44 Composição do Bloco - P _{rcd}	147
Tabela 45 Composição do Bloco - P _{arc}	147
Tabela 46 Composição do Bloco - CPIIE	147
Tabela 47 Composição do Bloco - CPIII.....	148
Tabela 48 Composição do Bloco - CPIV	148
Tabela 49 Composição do Bloco - LC ³	148
Tabela 50 Total das emissões CO ₂ e energia incorporada EI para o bloco referência e para os blocos com os materiais substituintes.	149
Tabela 51 Fator de desempenho para as emissões FdCO ₂ e para energia incorporada FdEI	149
Tabela 52 Substituição total dos materiais de referência	150
Tabela 53 Análise <i>Swot</i> Areia RCD	153
Tabela 54 Análise <i>Swot</i> Areia britada	154
Tabela 55 Análise <i>Swot</i> Pedrisco ARC	155
Tabela 56 Análise <i>Swot</i> Cimento CP II-E	156
Tabela 57 Análise <i>Swot</i> Cimento CP III.....	157
Tabela 58 Análise <i>Swot</i> Cimento CP IV	158
Tabela 59 Análise <i>Swot</i> Cimento LC ³	159
Tabela 60 Grau de risco associado	160
Tabela 61 Matriz de risco dos materiais substituintes	161
Tabela 62 Total das emissões CO ₂ e energia incorporada EI para o bloco com materiais substituintes	163
Tabela 63 Nível da performance ambiental dos blocos com materiais substituintes ...	163
Tabela 64 Nível de performance ambiental dos blocos.....	166
Tabela 65 Total das emissões CO ₂ e energia incorporada dos blocos de análise.....	169
Tabela 66 Redução das emissões dos blocos 1, 2, 3 e 4.....	170
Tabela 67 Redução da energia incorporada dos blocos 1, 2, 3 e 4.....	170
Tabela 68 Compensação do CO ₂ através do plantio de árvores	176

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	43
Equação 2	43
Equação 3	104
Equação 4	104
Equação 5	109
Equação 6	176

LISTA DE ABREVIACÕES

ABRECON – Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

ACVb – Avaliação de Ciclo de Vida do Bloco de Pavimento Intertravado de Concreto

ACVS – Avaliação do Ciclo de Vida Social

ADAMC – Avaliação do Desempenho Ambiental de Materiais Construtivos

AD – Argamassa Aderida

AN – Agregado Natural

AICV – Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

AR – Agregado Reciclado

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ARM – Agregado Reciclado Misto

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASUS – Avaliação de Sustentabilidade

AQUA – Alta Qualidade Ambiental

BEE – *Built Environment Efficiency*

BEPAC – *Building Environmental Performance Assessment Criteria*

BREEAM – *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*

BMCC – *Building Material and Component Combinations*

CASBEE – *Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency*

CCV – Custo do Ciclo de Vida

COP21 – Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2015

COP26 – Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DAP – Declaração Ambiental de Produto

DGNB – *Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen*

EAR – Estrutura Analítica dos Riscos

EI – Energia Incorporada

EPD – *Environmental Product Declaration*

F_d – Fator de Desempenho

FAPES – Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo

GEEs – Gases de Efeito Estufa

GBC – *Green Building Challenge*

HQE – *High Quality in Environment*

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

id – Índice de desempenho ambiental

ISMAS – Instrumento para a Seleção de Materiais Mais Sustentáveis

IS – Indicadores de Sustentabilidade

iiSBE – *International Initiative for a Sustainable Built Environment*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

JSBC – *Japan Sustainable Building Consortium*

LCA – *Life Cycle Assessment*

LC³ – *Limestone Calcined Clay Cement*

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

MAAS – Metodologia de Análise para Avaliação de Sustentabilidade

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

MPa – Resistência Característica do Concreto

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NABERS – *National Australian Buildings Environmental Rating System*

ONU – Organização das Nações Unidas

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

PBACV – Programa Brasileiro em Avaliação do Ciclo de Vida

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PCR – *Product Category Rules*

QAE – Qualidade Ambiental do Edifício

RCP – Regras das Categorias de Produtos

RCD – Resíduo da Construção e Demolição

SGE – Sistema de Gestão do Empreendimento

Tool – *SBTool Sustainable Building*

USGBC – *United States Green Building Council*

VUP – Vida Útil de Projeto

ZT – Zona de Transição

WPC – *Whole Process of the Construction*

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	dióxido de carbono
CO ₂ -eq	dióxido de carbono equivalente
CH ₄	metano
N ₂ O	óxido nitroso
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
Kg	quilograma
kgCO ₂ /m ²	quilograma de emissões poluentes de CO ₂ por m ²
tCO ₂	tonelada de emissões poluentes de CO ₂
MJ	megajoule
MJ/m ²	quantidade de energia incorporada por m ² (megajoule)
GJ	gigajoule
GJ/m ²	quantidade de energia incorporada por m ² (gigajoule)

1 INTRODUÇÃO

A tentativas de transformar uma economia linear tradicional em uma economia circular tornou-se um dos maiores desafios para tornar a sociedade mais sustentável. Essa transição requer uma abordagem interdisciplinar contemplando várias áreas do conhecimento, combinando considerações humanas, sociais, técnicas e gerenciais relacionadas à sustentabilidade ambiental.

Em um mundo cada vez mais consciente da importância da sustentabilidade, diversas questões têm sido estudadas com o intuito de encontrar soluções viáveis para a manutenção de um equilíbrio entre a industrialização e a oferta de recursos naturais: economia circular, reciclagem, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), Declaração Ambiental de Produto (DAP), pegada de carbono e pegada hídrica.

Hoje, os desafios ambientais que enfrentamos, como geração de resíduos, mudanças climáticas, escassez de recursos e perda da biodiversidade. Ao mesmo tempo, queremos sustentar nossas economias e oferecer oportunidades para uma população mundial em crescimento.

As mudanças climáticas observadas em todo o mundo, provocadas pela alta concentração de gases de efeito estufa (GEEs), causam mudanças no clima da Terra por longos períodos de tempo e ocasionam chuvas e temperaturas recordes. Esses episódios demonstram a necessidade de mecanismos mais eficazes no combate à poluição do meio ambiente (IPCC, 2019).

O século XXI vem registrando inúmeros desastres ambientais, como secas prolongadas, altos índices de queimadas nas florestas e enchentes ocasionadas pelas mudanças climáticas. Levando-se em conta os altos índices de poluição da água, do solo ou do ar, o ritmo de consumo de recursos naturais e a incerteza quanto à capacidade de depuração do planeta, chega-se à conclusão que, embora se tenha atingido o maior desenvolvimento tecnológico que a sociedade já experimentou, é preciso repensar a inter-relação entre o consumo dos recursos naturais e a sustentabilidade do meio ambiente (FIGUEIREDO, 2017).

Com isso, a ótica acerca da gestão ambiental vem se transformando no Brasil e no Mundo, no que tange à compreensão da atuação humana e seus efeitos sobre o meio ambiente, à

busca de novas soluções e à manifestação de novos instrumentos mais eficazes no combate aos impactos ambientais gerados pelo consumo exagerado decorrente do desenvolvimento humano, como consequência da era do Antropoceno, que está ocorrendo em uma escala sem precedentes em todo o mundo, tendo impactos evidentes na sociedade e no meio ambiente (YIGITCANLAR; KAMRUZZAMAN, 2018).

A ideia de “desenvolvimento sustentável” surgiu a partir do conceito de “ecodesenvolvimento”, proposto em Estocolmo, na Suécia, em 1972 durante a Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (MARIN; MASCARENHAS, 2020).

Foi nesse cenário que surgiram os conceitos de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade. Proposto inicialmente no chamado Relatório Brundtland, formulado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU, em 1987, o conceito de desenvolvimento sustentável se configurou, desde então, num tema dominante em quase todos os setores da economia (SAADE, 2017).

A indústria da construção civil é responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais referentes ao consumo de recursos naturais, geração de resíduos (SILVA; MELO, 2020), (CALDAS et al., 2020b), alto consumo de energia elétrica e combustíveis não renováveis, além de gerar em torno de 30% a 40% do total das emissões de CO₂ lançadas na atmosfera (ALBUQUERQUE et al., 2018). Consequentemente, é um dos principais impulsionadores desses impactos na economia.

Segundo Corlaite e Pereira (2020), muitos desses impactos ambientais estão diretamente relacionados à produção de materiais de construção.

O setor da construção é uma das áreas que mais contribui para a emissão de gases do efeito estufa (GEE) (ANDREO et al., 2021); assim, pela alta taxa de geração desses gases, ela é uma das responsáveis pela tão discutida e atual pegada de carbono (*carbon footprint*). Essa questão se relaciona com a emissão de diversos gases que causam impactos substanciais ao meio ambiente, e que aceleram o aquecimento global.

Os maiores impactos ambientais devidos à construção civil estão relacionados ao consumo de matéria-prima, esgotamento dos recursos naturais, energia incorporada na construção e emissões de CO₂, que regem o aquecimento global. Estudos comprovam que

as emissões de CO₂ da produção de cimento contribuem em torno de 5% a 8% do total das emissões globais de CO₂ (FREIRE, 2016); (SCRIVENER, 2014), e há previsão de que se quadrupliquem as emissões até o ano de 2050 (PILLAI et al., 2019); (IMBABI et al., 2012).

Isso significa que a construção civil pode contribuir mitigando as emissões desses gases, incorporando a pegada de carbono e quantificando as emissões de GEEs associadas ao ciclo de vida completo dos produtos (RODRIGUEZ; PEREZ, 2021), processos e materiais de construção. Através da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), do inglês *Life Cycle Assessment (LCA)*, é possível identificar o componente, fase ou produto com maior carga ambiental no processo em estudo, visando possíveis melhorias ambientais (ABDALLAH; ELFEKY, 2021).

A necessidade de desenvolver novos produtos e componentes construtivos com menores impactos sobre o meio ambiente é uma realidade com razões ambientais e econômicas. Uma breve revisão na literatura nos mostra que subprodutos industriais como fíller, pozolana e escória – utilizados para fabricação de concreto hidráulico – foram adicionados ao cimento com o objetivo de minimizar os impactos da extração e fabricação do clínquer (BATTAGIN, 2011), contribuindo com a pegada de carbono e impactos evitados pela não extração de matéria prima.

Diante da incontestável finitude das matérias-primas básicas para a construção civil e da problemática ocasionada pelos resíduos, a incorporação da sustentabilidade no processo de seleção de materiais desponta, atualmente, como uma premissa necessária para auxiliar a análise de aspectos inerentes à sustentabilidade dos materiais de construção civil (DALVI, 2014).

A busca por construções cada vez mais sustentáveis originou e impulsionou o desenvolvimento de ferramentas que têm como objetivo avaliar a sustentabilidade do ambiente construído. As ferramentas que auxiliam essa avaliação se encontram em expansão contínua, tanto a nível do número de países envolvidos e aceitação internacional, como a nível de avanços tecnológicos e aperfeiçoamentos técnicos.

O ato de projetar ou propor edificações mais sustentáveis implica em uma articulação mais próxima com os materiais e componentes da construção. Com base nessa premissa, e com ocorrência de novas demandas projetuais, surge a necessidade da avaliação

ambiental destes materiais e componentes, seus indicadores de sustentabilidade e seus respectivos impactos ambientais.

O uso de indicadores de sustentabilidade na escolha de materiais ou componentes para construção civil ainda não se destaca como premissa de planejamento. Essa característica está relacionada ao desconhecimento do conceito pelos profissionais e da ausência de critérios sistematizados e preestabelecidos como indicadores de sustentabilidade para o ambiente construído. A avaliação dos parâmetros de desempenho ambiental do ambiente construído consiste em um estudo dos indicadores de sustentabilidade.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A construção civil é a indústria que mais gera resíduos no planeta, e é responsável por relevante impacto ambiental; cerca de 50% a 75% dos recursos naturais do mundo são consumidos pela construção, considerando todo o seu ciclo de vida. Estima-se que 40% da energia mundial é consumida pela construção e uso nos edifícios, inclusive aproximadamente 15% dos recursos hídricos são consumidos por construções, e o setor é responsável por 30% a 40% das emissões de CO₂. É a indústria que mais gera resíduos do planeta. Além disso tudo, as poluições atmosféricas e sonoras causadas pela indústria da construção afetam a qualidade de vida dos seres vivos e do meio ambiente (IACC, 2019).

Conforme pesquisas sobre a quantificação de emissões poluentes e energia incorporada decorrentes dos materiais de construção civil empregados na construção de habitações, estes apresentam, atualmente, um custo ambiental do m² em torno de 224 a 235 kgCO₂/m² de emissões CO₂ e de 3,27 a 5,52 GJ/m² de energia incorporada nesse tipo de construção (LIMA et al., 2018); (MACIEL, 2016); (DIMOUDI; TOMPA, 2008); (TEODORO, 2017).

Contribuir com a pegada ambiental dos materiais de construção – visando uma redução das emissões poluentes e energia incorporada – através de produtos com menores cargas ambientais, processos e materiais menos poluentes e que possam contribuir com a redução dos impactos ambientais, pode ser o vislumbre de um amanhã mais sustentável, tanto para a construção civil, quanto para o meio ambiente.

A metodologia para avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos, identifica, direciona, avalia e apresenta potenciais melhorias ambientais no material construtivo, para uma redução efetiva de seus impactos ao meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para avaliação do desempenho ambiental de artefatos de concreto, visando uma redução efetiva de sua carga ambiental, e com possibilidade de ampliação de seu escopo para outros materiais construtivos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estabelecer um modelo estratégico para escolha de parâmetros de desempenho ambiental;
- Avaliar indicadores de sustentabilidade ambiental no artefato de concreto;
- Buscar a viabilidade ambiental a partir da performance ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto;
- Buscar melhorias ambientais no bloco de pavimento intertravado de concreto a partir de análise de indicadores de sustentabilidade ambiental;
- Avaliar métricas ambientais para estabelecer níveis de performance ambiental para o material construtivo.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho é composto de seis capítulos. Além deste Capítulo 1, este trabalho está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são apresentados a base teórica sobre os mecanismos promotores da sustentabilidade do ambiente construído (como economia circular, metodologias para avaliação do desempenho ambiental no ambiente construído e avaliação de ciclo de vida e declaração ambiental) e os processos geradores de impactos

ambientais relacionados à construção civil, além dos desafios relacionados à sustentabilidade na indústria da construção civil.

O Capítulo 3 apresenta a estrutura detalhada da Metodologia para Avaliação do Desempenho Ambiental de Materiais Construtivos, denominada Metodologia ADAMC.

No Capítulo 4 é apresentada a aplicabilidade da Metodologia ADAMC ao bloco de pavimento intertravado de concreto, com objetivo de reduzir as emissões de dióxido de carbono CO₂ e reduzir a energia incorporada EI.

No Capítulo 5 é realizada a avaliação dos resultados obtido pela Metodologia ADAMC, apresentando as melhorias ambientais no bloco de pavimento intertravado de concreto, através do índice de desempenho ambiental (Ida) e níveis de performance ambiental, apresentando a máxima eficácia ambiental, direcionada para a redução dos impactos ambientais. Também é apresentado o CO₂eq para o estudo de uma compensação ambiental.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns dos desafios relacionados à sustentabilidade da indústria da construção civil, como os processos geradores de impacto sobre o meio ambiente, tais como: extração da matéria prima, geração de resíduos, emissões de gases poluentes, energia incorporada na construção e os mecanismos promotores da pegada ambiental na construção civil. Para isto, utiliza como referência os estudos de Andreo et al., 2021; Rodríguez e Pérez, 2021; Caldas et al., 2020b e Dalvi, 2014, dentre outros.

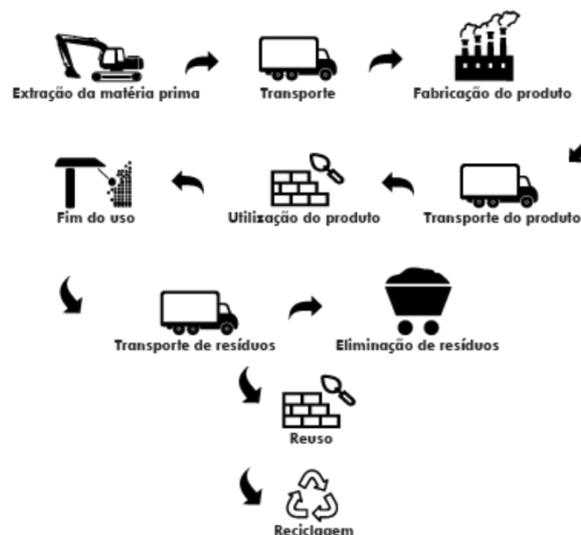
A indústria da construção consome, aproximadamente, 50% dos insumos naturais globais como minério de ferro, argila, areia, cascalho, cimento e madeira, e produz um dos maiores fluxos de resíduos do planeta (SILVA, MELO, 2020). Em uma economia circular, a reutilização de resíduos da construção, introduzidos em novos produtos, visa aumentar a eficiência dos recursos e mitigar a extração nas fontes naturais (CRUZ RIOS; GRAU; CHONG, 2019).

Os materiais de construção apresentam uma das maiores concentrações de energia incorporada (EI) e emissões de gases do efeito estufa (GEE) (ANDREO et al., 2021); (CALDAS et al., 2020b); (MEDEIROS; DURANTE; CALLEJAS, 2018); (CALDAS; SPOSTO, 2017). Como resultado, temos uma relação tênue entre construção civil e impactos ambientais, sendo grande parte desses impactos atribuída ao uso e extração de matéria prima não renovável.

Com base nesses parâmetros, o setor da construção civil pode contribuir com a redução de diversos impactos ambientais (RODRÍGUEZ; PÉREZ, 2021), ao incorporar a ACV e quantificar os possíveis impactos ambientais em seus processos, produtos e materiais de construção. Os resultados podem vir a nortear ações mais eficazes e direcionadas no combate à poluição do meio ambiente.

A ACV é um método que estuda os impactos ambientais, incorporando uma análise gerencial de todos os encargos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos, processos e partes de processos, abrangendo desde a extração até descarte ou reciclagem (ABDALLAH; ELFEKY, 2021). A Figura 1 demonstra o ciclo de vida de um produto da construção civil.

Figura 1 Ciclo de vida do agregado miúdo na construção civil



Fonte: Adaptado de (Agregados para Construção Civil - Relatório Técnico 31: Perfil da Areia para Construção Civil 2016, página 3).

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

A Economia Circular pode ser definida como um modelo que busca a extensão da vida útil de materiais e de produtos por maior período, de forma restaurativa e regenerativa por princípio. Seu objetivo é manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos. Busca, em última instância, dissociar o desenvolvimento econômico global do consumo de recursos finitos (TAVARES; BORSCHIVER, 2021), (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

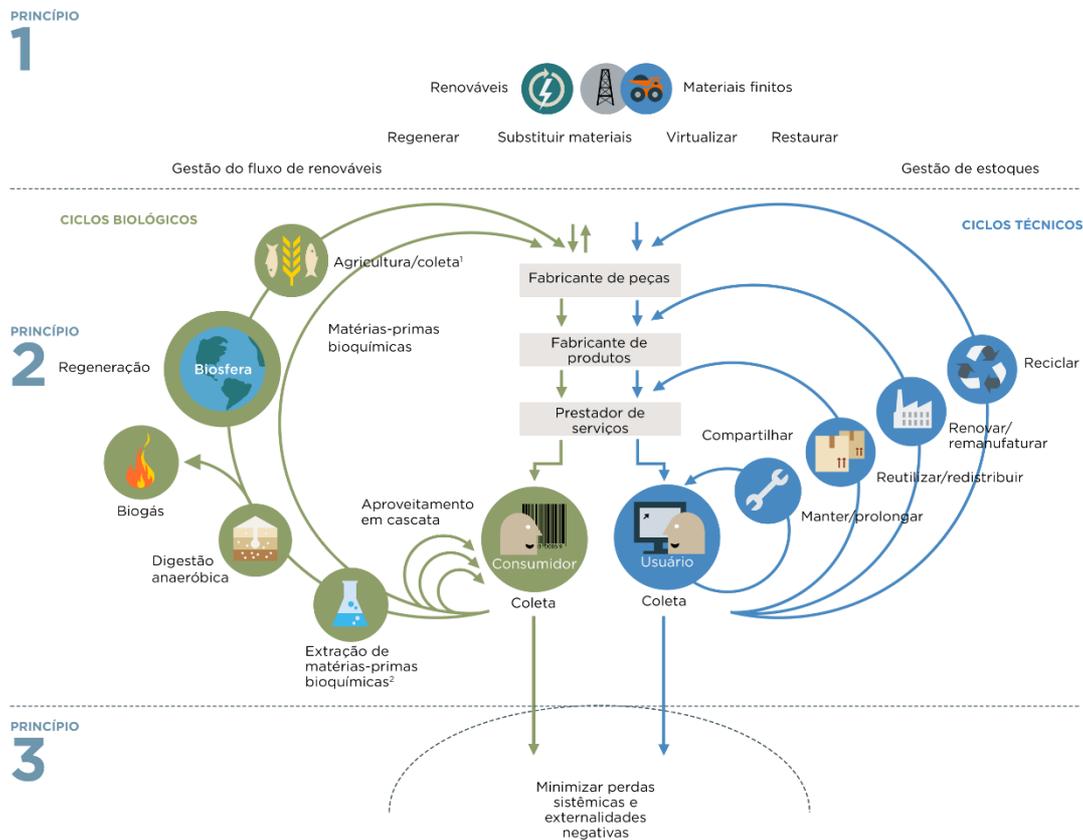
Cada vez mais, a sociedade como um todo tem enxergado a necessidade urgente de mitigar as externalidades negativas expostas pelo modelo econômico tradicional do *take-make-dispose* (extrair, transformar, descartar). A economia global é dominada por um modelo linear de produção e consumo no qual as mercadorias são produzidas com matérias primas virgens, comercializadas, usadas, e descartadas como resíduos (SEHNEM et al., 2019).

A economia circular é concebida como um ciclo contínuo de desenvolvimento positivo que preserva e aprimora o capital natural, otimiza a produtividade de recursos e minimiza riscos sistêmicos gerindo estoques finitos e fluxos renováveis. A economia circular

funciona de forma efetiva em qualquer escala (BARCELOS et al., 2021), (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

A Fundação Ellen Macarthur (2015) apresenta os três princípios nos quais a economia circular se apoia: princípio 1 – preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis; princípio 2 – otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico; e princípio 3 – estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio, como mostra a Figura 2.

Figura 2 Definição da economia circular



Fonte: (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015, página 6)

O ciclo técnico envolve a gestão dos estoques de materiais finitos. O uso substitui o consumo. Os materiais técnicos são recuperados e, em sua maior parte, restaurados no ciclo técnico. Já o ciclo biológico abrange os fluxos de materiais renováveis. O consumo só ocorre no ciclo biológico. Nutrientes renováveis (biológicos) são, em sua maior parte, regenerados no ciclo biológico (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Os estudos de Tavares, Borschiver e Ferreira (2018) sobre a relação entre a indústria química e o setor de bens de consumo não duráveis no contexto da economia circular demonstram que, a longo prazo, a economia circular pode reduzir custos com matérias-primas, riscos na volatilidade de preços e suprimentos de matérias-primas renováveis e não renováveis, estabelecendo sistemas econômicos mais resilientes e duráveis.

A economia circular não é apenas uma tendência, mas sim uma visão de futuro em um movimento que sinaliza transformações profundas na forma de produzir, distribuir, consumir e principalmente de pensar, a partir de critérios claros, na visão positiva de como contribuir para a construção de um futuro com abundância e não escassez (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020). A economia circular é uma nova forma de pensar o nosso futuro e como nos relacionamos com o planeta.

Para adotar esse novo sistema de economia circular, é necessário o apoio de governos e comunidades, sendo esses os promotores de uma consciência ambiental que inclua os objetivos de redução da poluição e uso de resíduos de outros setores como matéria-prima secundária para novos produtos.

Estudos realizados por Paschoalin et al., (2019) reforçam que a economia circular possibilita a criação de uma economia restauradora e regenerativa, na qual a entrada de recursos e a saída de resíduos e emissões são minimizadas pela criação de um ciclo econômico fechado; assim, a economia circular consiste em um conceito baseado na redução do consumo de matérias-primas naturais.

O conceito de economia circular vem ganhando destaque em discussões nos meios científicos e empresariais. Embora seja uma abordagem promissora, hoje ainda existem muitas barreiras para sua implementação. Nesse cenário, o crescente interesse pelo tema pode ser traduzido em barreiras a serem ultrapassadas, classificadas em 4 áreas principais: culturais, legais, de mercado e tecnológicas (CRUZ; GOES, 2021).

2.1.1 Economia Circular na Construção Civil

A transição da economia linear para a economia circular implica em alterações profundas no indivíduo e na sociedade. Não basta, de forma isolada e pontual, alterar alguns hábitos de consumo, promover a reciclagem e a eficiência energética ou promulgar políticas ambientais de resultados pouco eficazes. Hoje é essencial mudar de forma radical o

comportamento de todos e de cada um, promovendo uma educação para a sustentabilidade e para a economia circular (QUINTA et al., 2020), para amanhã colhermos o que plantamos hoje.

A indústria da construção civil está cada vez mais competitiva, exigindo um desenvolvimento e uma produção mais limpos e sustentáveis, e não somente a motivação de reduzir o desperdício de materiais, mas também ações que permitam a redução de custos e insumos, que reaproveitem e promovam o uso racional de recursos naturais e promovam o desenvolvimento econômico, regional e social. É necessário que as premissas de sustentabilidade sejam aplicadas desde a concepção do projeto, para que seus objetivos possam ser satisfatórios perante a sustentabilidade da construção civil e ambiental (BARBOZA et al., 2019).

A construção civil caminha em direção à economia circular e há diversas ações que vão nesse sentido. Hoje a construção civil possui um modelo econômico linear e enfrenta dificuldades para se afastar dele. Seu maior desafio é desenvolver processos, materiais e construções que permitam reutilizar seus materiais e/ou resíduos em novos ciclos, com a mesma qualidade ou superior, característica da reciclagem do tipo *upcycle*.

De acordo com pesquisa da Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON), os resíduos de construções e demolições representam de 50% a 70% dos rejeitos sólidos produzidos pelas cidades brasileiras médias e grandes (SILVA; MELO, 2020), (ABRECON, 2011).

Essa predominância do resíduo da construção civil evidencia a dificuldade enfrentada pelo setor de evitar o fim da vida útil dos materiais de construção civil. Há de fato muita coisa que não tem mais utilidade, pelo fato de não ter sido pensado desde suas concepções que os materiais continuariam empregados em ciclos de vida com a mesma qualidade ou superior.

A economia circular considera que os edifícios sejam fontes de matérias-primas secundárias. Dessa forma, cada parte de uma construção tem seu valor e está inserida em um ciclo. O objetivo é tornar os materiais usados nesses edifícios reutilizáveis nas próximas gerações de construção. Cada uma dessas partes tem duração diferente e o projeto deve levar isso em consideração.

2.2 METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Este tópico dedica-se a retratar de forma cronológica a evolução e incorporação do conceito de sustentabilidade na indústria da construção civil.

As metodologias de avaliação do desempenho ambiental do ambiente construído e os mecanismos de certificação ambiental são instrumentos que vêm, desde os anos 90, despertando gradativamente a atenção dos atores envolvidos no processo de construção do ambiente construído.

Esses mecanismos vêm sendo utilizados para analisar o desempenho de edificações, e objetivam refletir a significância do conceito de sustentabilidade presente no projeto ou no ambiente construído, ao fornecerem uma análise abrangente das suas características e dos impactos que produzem em seus ocupantes, no entorno, e no meio ambiente como um todo.

As metodologias de avaliação de desempenho ambiental na construção civil constituem um arcabouço vasto e em evolução, com questões metodológicas ainda por se definirem e se aperfeiçoarem; no entanto, existem algumas metodologias mais utilizadas em determinados países como: Canadá, USA e Inglaterra. O maior problema reside na subjetividade associada ao conceito de sustentabilidade, motivada principalmente pelos indicadores de sustentabilidade, critérios ou níveis mínimos de desempenho ambiental utilizados por cada metodologia.

O uso de *benchmarks* como referência define um nível mínimo ou padrão para os indicadores de sustentabilidade, permitindo a rápida comparação, avaliação e identificação do desempenho ambiental. O benchmark é o ato de comparar de forma eficiente e equivalente a performance, neste caso o desempenho ambiental.

O Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) fornece a base conceitual para o desenvolvimento das metodologias de avaliação do desempenho ambiental no ambiente construído, que surgiram na década de 90 primeiramente na Europa, nos EUA e no Canadá, como parte das estratégias para o cumprimento de metas ambientais (SILVA, 2007).

O termo *Green Building* foi então criado para expressar todas as iniciativas dedicadas ao ambiente construído que utilizem recursos naturais de maneira eficiente, com claro foco

no bem-estar do usuário, uso de energia, uso de recursos renováveis e que tenham maior longevidade, adaptando-se às mudanças e necessidades dos usuários e da tecnologia.

A expressão construção verde, do inglês “*Green Building*”, é comumente utilizada enquanto sinônimo de construção sustentável, se referindo ao ambiente construído com alto desempenho ambiental.

A necessidade de se avaliar o desempenho ambiental de edifícios veio exatamente com a constatação de que mesmo os países precursores de *Green Building* ou construção verde não possuíam meios para verificar quão "verdes" eram de fato os seus edifícios já existentes (FOSSATI, 2012), (WEN et al., 2020).

Atualmente existem em diversos países diretrizes metodológicas para avaliação do desempenho ambiental relacionado ao ambiente construído, como: BREEAM - Reino Unido, BEPAC - Canadá, LEED - Estados Unidos, SBTool - Canadá, NABERS - Austrália, CASBEE - Japão, DGNB - Alemanha, AQUA - Brasil, ASUS - Brasil, Norma Europeia EN 15804 (CEN, 2012), ABNT NBR, 15575-1:2013 - Brasil, ISMAS - Brasil.

2.2.1 Metodologia BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*)

A metodologia BREEAM é considerada um dos primeiros métodos de avaliação do desempenho ambiental na construção civil. Foi lançado no Reino Unido em 1990 por pesquisadores do BRE36 e com participação do setor privado em parceria com a indústria da construção, visando à especificação e à mensuração de desempenho das edificações. A metodologia pode ser adaptável a diversas regionalidades. O processo de avaliação é fundamentado e avaliado através de auditoria externa.

O objetivo do BREEAM é avaliar, incentivar e premiar a sustentabilidade ambiental, social e econômica em todo o ambiente construído, fornecendo diretrizes sobre como minimizar os efeitos adversos dos edifícios nos ambientes local e global e, ao mesmo tempo, promover um ambiente interno saudável e confortável (BREEAM, 2018). A metodologia BREEAM tem como objetivos:

- Incentivar a melhoria contínua do desempenho e a inovação, definindo e avaliando uma ampla gama de requisitos cientificamente rigorosos que vão além dos regulamentos e práticas atuais,

- Capacitar aqueles que possuem, comissionam, entregam, gerenciam ou usam edifícios, infraestrutura ou comunidades para alcançar suas aspirações de sustentabilidade,
- Construir confiança e valor fornecendo certificação independente que demonstre os benefícios mais amplos para indivíduos, negócios, sociedade e meio ambiente.

Atualmente existem 5 versões da metodologia BREEAM, sendo métodos para classificar edificações novas, edificações em uso, infraestruturas, comunidades e edificações em remodelação e projetos ou ativos em vários estágios do ciclo de vida do edifício. Essas versões incluem:

- Planejamento mestre de uma comunidade maior de edifícios – Comunidades BREEAM;
- Edifícios para construção nova, edifícios domésticos e não domésticos – BREEAM *New Construction*;
- Infraestrutura para novos projetos de infraestrutura de construção – BREEAM *Infrastructure*;
- Edifícios não domésticos existentes em uso – BREEAM *In-Use*;
- Instalações e remodelações de edifícios domésticos e não domésticos – BREEAM *Refurbishment and Fit Out. (Retrofit)*.

O método BREEAM avalia as seguintes categorias com diferentes pesos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 Categoria avaliada pelo método BREEAM

Categoria avaliada	% pontuação
Gerenciamento	11%
Saúde e bem-estar	14%
Energia	16%
Transporte	10%
Água	6%
Materiais	15%
Resíduos	6%
Uso da terra e ecologia	13%
Poluição	8%

Potencial de inovação*	10%
*Potencial de inovação aumenta em até 10%	
*Pontuação total máxima 100%	

Fonte: (BREEAM, 2018, página 12)

Para avaliação de novas edificações, utiliza critérios sobre as categorias de gestão, saúde e bem-estar, energia, transporte, água, materiais, resíduos, utilização do solo e ecologia, poluição e inovação, enquanto analisa os parâmetros de governança, bem-estar social e econômico, recursos e energia, utilização do solo e ecologia, e transporte e movimento para avaliar as comunidades sustentáveis (BREEAM, 2018).

Cada classificação BREEAM representa um índice de desempenho equivalente (*Performance equivalent*). A soma das percentagens determina a classificação, que pode corresponder a: *Unclassified* (Não classificado), *Pass* (Aprovado), *Good* (Bom), *Very Good* (Muito Bom), *Excellent* (Excelente), *Outstanding* (Excepcional), como demonstra a Tabela 2.

Tabela 2 Referências de classificação BREEAM

Classificação BREEAM	% pontuação
Excepcional	≥ 85
Excelente	≥ 70
Muito bom	≥ 55
Bom	≥ 45
Aprovado	≥ 30
Não classificado	< 30

Fonte: (BREEAM, 2018, página 34)

O cálculo para atingir a classificação é determinado por critérios definidos para cada categoria, que recebem um número de créditos e peso em percentagem relacionados ao total considerado pela certificação (BREEAM, 2018), (DOTTO; SILVA, 2019).

2.2.2 Metodologia BEPAC (*Building Environmental Performance Assessment Criteria*)

O método *Building Environmental Performance Assessment Criteria* foi o primeiro estudo canadense desenvolvido para avaliação do desempenho ambiental de edifícios. A primeira versão foi lançada em dezembro de 1993 para edifícios construídos (COLE; ROUSSEAU; THEAKER, 1994).

O desempenho ambiental de um edifício resulta da interação do edifício e seus sistemas principais, conjunto denominado no BEPAC de “edifício-base”, com a maneira com que o edifício é utilizado, gerido e operado (SILVA, 2007). A metodologia é orientada a incentivos, e distingue critérios de projeto e de gestão separados para o edifício-base e para as formas de ocupação que ele abriga.

A estrutura da metodologia BEPAC distingue critérios de projeto e de gestão separados para o edifício-base e para a tipologia de ocupação. Estes créditos estão distribuídos em quatro módulos: (1) projeto do edifício base; (2) gestão do edifício-base; (3) projeto da ocupação (defaults de ocupação); e (4) gestão da ocupação.

Cada módulo é avaliado segundo cinco categorias: 1. proteção da camada de ozônio, 2. impacto ambiental do uso de energia, 3. qualidade do ambiente interno, 4. conservação de recursos e 5. Local, contexto de implantação e transporte, como demonstra a Figura 3.

Figura 3 Estrutura do BEPAC



Fonte: (SILVA, 2007, página 17)

O BEPAC é um método cujo resultado é expresso através de um resultado numérico. Os parâmetros de avaliação definidos para cada área são divididos em Essenciais, Importantes ou Suplementares, e podem receber uma pontuação de 1 a 10 pontos.

Os parâmetros finais para avaliação do desempenho da edificação são obtidos através da multiplicação dos pontos por fatores de ponderação, que pretendem refletir a sua prioridade e importância em relação aos restantes critérios da mesma categoria. No certificado final são registados o total de créditos obtidos em cada área e estes são mostrados em relação ao valor máximo possível para cada categoria (LUCAS, 2011).

O método BEPAC estabelece a avaliação de características específicas em momentos diferentes do projeto e do ciclo de vida de um edifício, podendo ser considerado uma

solução eficaz para as exigências básicas da avaliação de qualidade ambiental de uma construção em vários dos seus momentos(CALIXTO, 2016). A avaliação é feita por avaliadores treinados pelo BEPAC ou por especialistas que demonstrem conhecimento reconhecido em todos os campos avaliados.

O método BEPAC realiza uma avaliação completa que fornece critérios de avaliação não só do próprio projeto de um edifício, mas igualmente do seu ciclo de vida, incluindo manutenção e operação. Trata-se de um método padronizado e abrangente desenvolvido exclusivamente para a avaliação do desempenho ambiental de edifícios.

2.2.3 Metodologia LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*)

O Método *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)* surgiu em abril de 1993 nos Estados Unidos da América (EUA). Esta metodologia foi desenvolvida pela *United States Green Building Council (USGBC)*, organização que visa a promoção de edifícios ambientalmente responsáveis e de alto desempenho, assim como de locais saudáveis para viver e trabalhar.

No método LEED, o desempenho ambiental do edifício é avaliado de forma integral, ao longo de todo o seu ciclo de vida, considerando os princípios fundamentais do que constituiria um “edifício verde”. Existe um critério mínimo de nivelamento exigido para a avaliação do edifício, uma pré-seleção traduzida no cumprimento de uma série de pré-requisitos.

Após a verificação do cumprimento de todos os requisitos pré-estabelecidos, o edifício se torna elegível, e inicia-se então a etapa de análise e classificação de desempenho ambiental do ambiente construído, com a atribuição de créditos baseados em uma lista previamente selecionada de objetivos.

Este método avalia o desempenho ambiental das construções para várias funcionalidades e tipologias, analisando as fases de concepção, construção e operação dos edifícios.

O LEED possui uma estrutura simples, apresentada em forma de um checklist técnico facilmente utilizável para projetos em desenvolvimento ou edificações já existentes. O critério mínimo para classificação é o cumprimento de 9 pré-requisitos; após essa etapa, o edifício pode receber até 110 pontos distribuídos em 8 categorias (HOPE, 2021).

Um mínimo de 40 pontos é necessário para a certificação. O LEED tem quatro níveis de certificação, dependendo dos limites de pontos alcançados: “certificado” com 40 a 49 pontos, “prata” com 50 a 59 pontos, “ouro” com 60 a 79 pontos e “platina” com 80 ou mais pontos (HOPE, 2021). Todas as categorias têm o peso definido pelo número de requisitos exigidos. Isto é, não há ponderação entre categorias, mas o número variável de itens referente a elas define implicitamente seus pesos.

Essa metodologia de avaliação é baseada em especificações de desempenho e a avaliação é realizada através da obtenção de créditos para o atendimento de critérios pré-estabelecidos, definindo padrões de sustentabilidade em construções e planejamento. É uma certificação que promove projetos que reduzem a poluição, economizam energia, racionalizam o uso da água e utilizam materiais reciclados e não agressivos (OLIVEIRA, 2011).

A metodologia de avaliação LEED é desenvolvida para transformar o ambiente construído em um ambiente sustentável, com o objetivo de fornecer à indústria da construção parâmetros consistentes com os quais se conceitua um edifício verde ou sustentável. O sistema de avaliação é desenvolvido e refinado continuamente por meio de um processo aberto (CARVALHO, 2009).

A primeira etapa da certificação do LEED é um registro inicial para o projeto; já para obter a certificação, um projeto ou edifício deve possuir determinados pré-requisitos e níveis de desempenho, estabelecidos como marcas de referência (*benchmarks*), créditos atribuídos de acordo com cada categoria. A certificação é válida por cinco anos e após esse período deve haver nova solicitação de avaliação (HOPE, 2021).

Ele funciona tanto como um sistema de certificação ou um checklist técnico como um guia de projeto para novas construções ou construções já existentes. O seu checklist de verificação orienta os projetistas a reduzir os impactos ambientais através de suas categorias que podem variar de acordo com a versão do LEED utilizada.

2.2.4 Ferramenta SBTool (*Sustainable Building Tool*)

A Ferramenta SBTool (*Sustainable Building Tool*) é uma metodologia para avaliar e medir a sustentabilidade de edifícios e construções. A ferramenta é amplamente utilizada

por profissionais do setor da construção civil, para avaliar o desempenho ambiental, social e econômico dos edifícios.

A aplicação da Ferramenta SBTool geralmente começa no estágio de projeto do edifício, onde os profissionais usam a ferramenta para avaliar o desempenho de diferentes aspectos do projeto, como eficiência energética, uso de recursos naturais, qualidade do ar interno, gerenciamento de resíduos e impacto social. A ferramenta oferece uma estrutura para avaliar e medir o desempenho do edifício em cada uma dessas áreas, permitindo que os profissionais identifiquem áreas onde melhorias podem ser feitas.

A ferramenta *Sustainable Building Tool - SBTool* realiza uma avaliação do desempenho de edifícios criada pelo *Green Building Challenge - GBC*. Essa ferramenta nasceu de uma união de esforços entre 21 países que está desenvolvendo e testando, desde 1996, um método de avaliar a sustentabilidade de edifícios. O GBC surgiu sob a administração do *Natural Resources Canada*, mas a partir de 2002 sua responsabilidade passou para o *International Initiative for Sustainable Built Environment – iiSBE* (COLE; LARSSON, 2002).

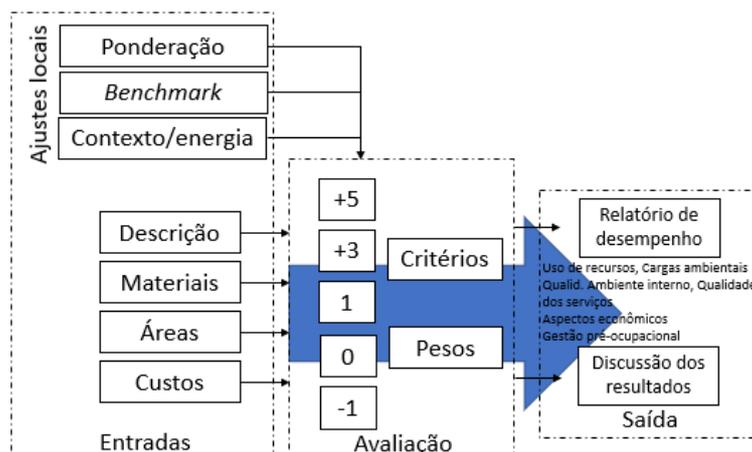
O *SBTool* é uma metodologia baseada no *software* Microsoft Excel. Anteriormente conhecido como *Green Building Tool - GBTool*, foi projetado para avaliar a sustentabilidade de edifícios. Essa metodologia pode ser modificada por equipes locais, sendo capaz de respeitar diversidades técnicas e regionais. A metodologia *SBTool* vem evoluindo constantemente, e atualmente a versão mais recente é a *SBTool 2012-20* (IISBE, 2022).

A *SBTool* é composta por dois módulos distintos de avaliação que estão vinculados às fases do ciclo de vida: um para avaliação do local, realizada na fase de pré-projeto, e outro para avaliação de edifícios, realizada nas fases de projeto, construção e uso/operação. Cada um desses módulos de avaliação é dividido em dois arquivos, o Arquivo A, relacionado às configurações relevantes para a tipologia de projeto e sua localidade (LARSSON, 2012a), e o Arquivo B, preparado para receber os valores/pontuação do Arquivo A; dessa forma, o Arquivo B estabelecerá pesos e desempenhos de referência (*benchmarks*) para muitos projetos (LARSSON, 2012b).

A *SBTool* tenta expressar a maioria dos parâmetros possíveis em forma numérica, mas em alguns casos isto não é possível. Em todos os casos, valores de desempenho são relacionados a uma escala que varia de -1 a +5, com as seguintes interpretações:

- nível (-1) de desempenho insatisfatório, abaixo do mínimo de desempenho aceitável
- nível (0) mínimo desempenho aceitável (geralmente, mas nem sempre, definido por regulamentações)
- nível (+3) boas práticas
- nível (+5) melhores práticas, como demonstra a Figura 4.

Figura 4 Esquema de ponderação do SBTool



Fonte: Adaptado de (LARSSON, 2012a) *Part A, User Guide to the SBTool 2012 assessment framework*

A pontuação é atribuída por comparação com desempenhos de referência (*benchmarks*). Os parâmetros de desempenho são de dois tipos: os que podem ser expressos em valores numéricos (critérios quantitativos) e outros que são mais bem descritos em forma de texto (critérios qualitativos). As equipes de avaliação indicam a melhor ponderação entre as categorias de impacto em cada caso (CALIXTO, 2016), (AULICINO, 2008).

Os ajustes locais e a entrada de dados são realizados pelas equipes locais, que fornecem contexto, descrição da matriz energética, descrição do edifício, áreas, características dos materiais e aspectos econômicos, caracterização de desempenho de referência (*benchmarks*) e fatores de ponderação. Em seguida, é realizada a avaliação, respeitando

os critérios e pesos atribuídos para cada categoria. A saída dos dados (relatório e resultados) é gerada automaticamente.

Além dos parâmetros de desempenho, as ponderações são outro aspecto customizado pelas equipes locais. A importância das diferentes categorias é considerada através de critérios de ponderação ajustados pelas equipes para garantir que os resultados reflitam o contexto de avaliação específico. A pontuação global do edifício é obtida pela agregação das pontuações com suas respectivas ponderações (MORAES, 2013).

A metodologia *SBTool* avalia 14 indicadores de desempenho ambiental na edificação, dos quais 9 são obrigatórios para todas as versões, segundo a *Part A, User Guide to the SBTool 2012 assessment framework* (LARSSON, 2012a), determinados por área e por área e ocupação:

1. Consumo total de energia primária incorporada, GJ;
2. Consumo anual de energia primária incorporada, MJ/ano;
3. Consumo anual de energia primária para operação do edifício, MJ/ano;
4. Consumo anual de energia primária não-renovável para operação do edifício, MJ/ano;
5. Consumo anual de energia primária incorporada e para operação do edifício, MJ/ano;
6. Energias renováveis totais usadas para operação do edifício, MJ/ano;
7. Consumo anual de água potável para operação do edifício, m³/ano;
8. Uso anual de água cinza e água da chuva para operação do edifício, m³/ano;
9. Emissão anual de gases do efeito estufa para operação do edifício, kg. CO₂ equivalente por ano;
10. Temperatura em áreas de ocupação primárias naturalmente ventiladas por mais de 90% das horas ocupadas, °C;
11. Proporção de área de estruturas existentes reutilizadas no novo projeto, %;
12. Proporção de área do projeto provido por reuso de estruturas existentes, %;

13. Consumo total de luz natural ou potencial de energia solar, %;

14. Adaptabilidade a tecnologias inovadoras.

Os próprios projetistas, executores ou operadores do edifício fornecem a descrição da edificação em avaliação, mas não participam da definição de benchmarks ou dos fatores de ponderação, que são de responsabilidade exclusiva da equipe de avaliação, conforme *Part B, User Guide to the SBTool 2012 assessment framework* (LARSSON, 2012b).

O resultado do desempenho global do edifício é determinado por meio de indicadores de sustentabilidade ambiental, ou seja, medidas absolutas do desempenho que caracterizam as práticas sustentáveis do edifício e que facilitam a comparação internacional entre edifícios.

2.2.5 Metodologia NABERS (*National Australian Built Environment Rating System*)

A metodologia *National Australian Built Environment Rating System*, NABERS, foi criada e lançada em 1998 pela Austrália, com o objetivo de fazer uma avaliação generalizada da qualidade do desempenho ambiental dos edifícios de escritórios e de habitação no país. O método foi criado pelo *Auckland Services Limited* da Universidade da Tasmânia e pela empresa *Exergy Australia Pty Ltd* e consiste em uma adaptação de dois métodos já consagrados de avaliação do desempenho ambiental das edificações: o BREEAM e o LEED (VALE, R. VALE, 2022).

A metodologia compara recursos que possibilitam a verificação e análise do desempenho ambiental de edifícios de escritórios, hotéis, centros comerciais, data centers e residências, apoiando-se em desempenhos ambientais de referência de edifícios existentes. Essa verificação é realizada por meio de auditoria externa realizada por profissionais qualificados e certificados.

A metodologia de avaliação da sustentabilidade de edifícios NABERS apresenta uma natureza de cálculo bastante simples. Para a avaliação, o proprietário fornece dados e informações do desempenho do edifício nos últimos 12 meses, referentes a energia, água, resíduos e ambiente interior. Esses dados são devidamente tratados e comparados com valores de referência (VALE, R. VALE, 2022).

A metodologia NABERS utiliza uma classificação de sustentabilidade simples e confiável para o ambiente construído; a NABERS fornece uma classificação de uma a seis estrelas para eficiência de edifícios em: energia, água, resíduos e ambiente interno. A metodologia NABERS permite medir, entender e comunicar com precisão o desempenho ambiental do ambiente construído, ao mesmo tempo em que identifica áreas para economia de custos e melhorias futuras.

Esse procedimento comparativo leva, então, a uma avaliação qualitativa em escala numérica de estrelas que, na maioria dos subsistemas NABERS, vai de 1 a 6, sendo 1 a classificação referente ao mais baixo desempenho, 2 abaixo da média, 3 a classificação referente ao desempenho presente nos edifícios atuais das respectivas tipologias ou a média, 4 classificação boa ou regulamentar mínima para construção nova em alguns estados australianos, 5 classificação excelente e 6 a classificação referente ao desempenho mais elevado, excelente e avançado, como demonstra a Figura 5.

Figura 5 classificações NABERS



Fonte: adaptado de (VALE, R. VALE, 2022)

O sistema de avaliação NABERS incide na avaliação independente de 4 quesitos: energia, água, resíduos e ambiente interno. Contudo, a sua aplicação é diferenciada quanto à tipologia dos edifícios analisados. A tipologia referente a edifícios de escritórios é aquela em que tem havido maior expansão de certificação ambiental e, conseqüentemente, as verificações a efetuar se apresentam de forma mais abrangente e concreta (MORAES, 2013).

A avaliação NABERS pode permitir, com uma simples pontuação, determinar se os impactos ambientais estão sendo bem geridos, em comparação com edifícios semelhantes. Após percepção dos impactos ambientais de determinado edifício ou projeto, pode-se então promover o aumento da sua sustentabilidade (CALIXTO, 2016).

2.2.6 Metodologia CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency*)

A metodologia *Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency* é utilizado para avaliar e classificar o desempenho ambiental do ambiente construído. O CASBEE foi desenvolvido por um comitê de pesquisa estabelecido em 2002 através da colaboração da academia, indústria e governos nacionais e locais, que estabeleceram o *Japan Sustainable Building Consortium (JSBC)* (IBEC, 2022).

A metodologia CASBEE avalia e opera de forma diferente para edifícios novos ou edifícios já existentes. Podemos classificar o CASBEE como o método mais complexo de avaliação. Uma das suas características mais interessantes é a forma como articula o desempenho ambiental com o impacto ambiental correspondente.

O CASBEE foi projetado para melhorar a qualidade de vida das pessoas e reduzir o uso de recursos naturais através do ciclo de vida, através da análise das cargas ambientais associadas ao ambiente construído, tendo como objeto uma edificação ou uma área urbana como um todo (IBEC, 2022).

A estrutura conceitual do CASBEE se caracteriza por dois pontos focais: a definição de limites do sistema analisado ou edifício, e o levantamento e balanceamento entre impactos positivos e negativos gerados ao longo de seu ciclo de vida (SILVA, 2007).

A metodologia CASBEE aplica o conceito de sistema fechado, um espaço hipotético encerrado pelos limites do terreno para determinar a capacidade ambiental relacionada ao edifício a ser avaliado. Esse limite define e distingue claramente o espaço dentro dos limites do terreno como propriedade privada e fora dele como propriedade pública. Em relação a esses dois tipos de espaços (IBEC, 2022), o CASBEE define dois fatores:

- Cargas ambientais (L): impactos negativos que se estendem para fora do espaço hipotético (para o ambiente público);
- Qualidade ambiental (Q): qualidade e desempenho ambiental do edifício dentro do espaço hipotético.

A metodologia de avaliação ambiental CASBEE aponta para os impactos positivos e negativos que uma construção ocasiona no meio ambiente, sendo que, para uma melhor percepção do que deve ser ou não contabilizado, define uma fronteira hipotética entre o espaço construído e o ambiente público. Assim, a sua aplicação passa por combinar estes dois espaços, estabelecendo as suas relações e os impactos que o espaço construído causa (IBEC, 2014). Desta forma, a avaliação CASBEE associa-se a duas grandes componentes ambientais, a qualidade ambiental (Q), que diz respeito ao espaço construído, e a carga ambiental (L), como demonstra a Figura 6.

Figura 6 Estrutura conceitual do CASBEE



Fonte: (SILVA, 2007, página 26)

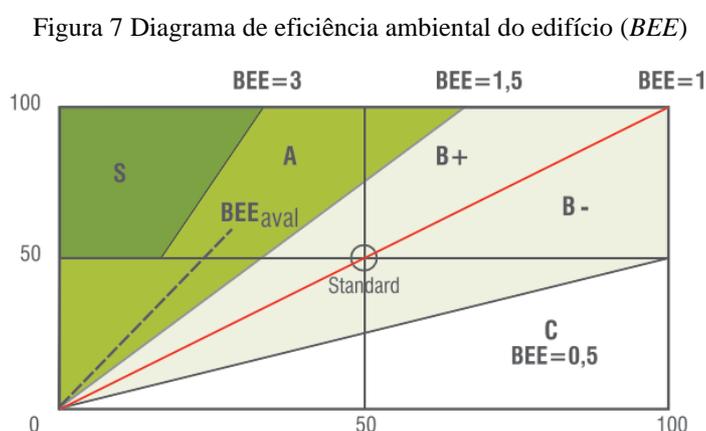
O conceito original de ecoeficiência expressa o valor do produto ou serviço às cargas ambientais a ele associadas. Para integrar a avaliação desses dois fatores associados aos espaços dentro e fora do limite do sistema (edifício), o CASBEE aplica o conceito de indicador de eficiência ambiental do edifício *Building Environmental Efficiency* (BEE). Quanto maior o quociente do BEE qualidade/cargas, onde qualidade enfatiza a qualidade do ambiente interno, e cargas, o uso de energia, maior a sustentabilidade ambiental do edifício (SILVA, 2007).

A classificação ambiental enquadra-se numa classificação qualitativa do cumprimento dos critérios analisados que se insere numa escala numérica de classificação de 1 a 5, sendo a classificação 3 correspondente a um valor de referência de um edifício corrente com razoável desempenho ambiental (IBEC, 2014).

Através deste sistema de classificação numérica são determinadas as respectivas classificações de cada categoria também numa escala da 1 a 5. Esse último procedimento

tem por base fatores de ponderação referentes aos critérios classificados para a categoria onde se incluem. As categorias, por sua vez, também estão associadas a fatores de ponderação para a componente ambiental respectiva, Q ou L. Assim, é possível a quantificação de cada componente Q e L que, conjuntamente, irão resultar na determinação do indicador *Building Environmental Efficiency* (BEE).

A utilização do BEE permite uma apresentação mais simples e clara dos resultados da avaliação do desempenho ambiental dos edifícios. Os valores *BEE* são representados no gráfico traçando L no eixo x e Q no eixo y. O resultado da avaliação do valor BEE é expresso como o gradiente da linha reta que passa pela origem (0,0), como demonstra a Figura 7.



Fonte: (SILVA, 2007, página 28)

Quanto maior o valor Q e menor o valor L, mais íngreme é o gradiente e mais sustentável será o edifício. Usando esta abordagem, torna-se possível apresentar graficamente os resultados das avaliações do ambiente construído utilizando áreas delimitadas por esses gradientes. A Figura 7 mostra como os resultados da avaliação para edifícios podem ser classificados em um diagrama com classificação C, classificação B-, classificação B+, classificação A e classificação S, em ordem crescente de valor BEE (IBEC, 2022). A Tabela 3 demonstra as exigências para classificação.

Tabela 3 Exigências classificativas do indicador BEE e níveis de classificação do sistema de avaliação CASBEE

<i>Indicador Building Environmental Efficiency</i> (BEE)	
Exigências Classificativas	Classificações CASBEE
$BEE < 0,5$	C Fraco
$0,5 \leq BEE < 1,0$	B- Ligeiramente Fraco

$1,0 \leq BEE < 1,5$	B+ Bom
$1,5 \leq BEE < 3,0$ ou $BEE \geq 3,0$	A Muito Bom
$BEE \geq 3,0$	S Excelente

Fonte: adaptado de (IBEC, 2014)

A metodologia CASBEE baseia-se em critérios e *benchmarks* e é composta por várias ferramentas para diferentes estágios do ciclo de vida. Ela trabalha com um índice de eficiência ambiental do edifício (BEE), e aplica ponderação fixa em todos os níveis.

2.2.7 Metodologia DGNG (*German Sustainable Building Council*)

A metodologia DGNG foi criada pelo Conselho Alemão para Edifícios Sustentáveis, Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen (DGNB), fundada em 2007 por uma variedade de especialistas na indústria imobiliária e de construção que queriam fazer mais para promover a construção sustentável no futuro (DGNB, 2022).

Na qualidade de organização não governamental sem fins lucrativos, a DGNB considera-se obrigada pelo dever de servir a sociedade para o bem geral. Tem objetivo de sensibilizar o público para a necessidade da construção sustentável e, acima de tudo, demonstrar que é de fato alcançável (DGNB, 2022).

A certificação ambiental da metodologia DGNB pode ser realizada tanto nas fases de construção e operação, como na fase de concepção, admitindo-se, assim, uma pré-certificação. Todo o processo é feito de forma independente por profissionais DGNB altamente qualificados.

Os auditores efetuam as avaliações DGNB, mas não estão vinculados à organização com o mesmo nome. Essa última apenas verifica as análises dos auditores e aprova ou não as certificações ambientais. Outros intervenientes nesse sistema são os consultores. Estes adequam-se ao contexto internacional, aconselhando proprietários e promotores sobre as melhores políticas e medidas a implementar para obter a certificação DGNB (MORAES, 2013).

A metodologia DGNB para construção nova de escritórios e edifícios administrativos, além das vertentes ambientais e econômicas, enquadra-se, significativamente, no conforto dos espaços, pois considera esse fator como primordial para a motivação dos trabalhadores. A última versão deste subsistema está em vigor desde 2012 e apresenta 5

categorias constituídas por 10 critérios, estes últimos constituídos por um total de 37 subcritérios (MORAES, 2013).

A metodologia DGNB é baseada em três fatores fundamentais:

- Avaliação do ciclo de vida
- Abordagem holística
- Ênfase no desempenho

A metodologia de avaliação do desempenho ambiental DGNB oferece uma variedade de opções de tipologias de edificações, ambientes internos e áreas urbanas, não apenas para novos edifícios, mas também para edifícios existentes.

O DGNB funciona como uma metodologia de planejamento e otimização, auxiliando na elevação da sustentabilidade da construção civil. Também promove uma compreensão compartilhada dos requisitos pertinentes dos métodos de construção sustentável entre todas as partes envolvidas nos projetos em desenvolvimento.

Os requisitos vão desde a seleção dos tipos certos de materiais até a reflexão sobre os fatores de bem-estar dos usuários, o que reflete os critérios que desempenham um papel central na forma como edifício é avaliado. Isso porque, no final das contas, eles determinam se um edifício é realmente sustentável. Para avaliar e definir objetivamente a sustentabilidade de edifícios e centros urbanos, a DGNB avalia uma bateria abrangente de fatores de qualidade, abrangendo todo o ciclo de vida de um edifício por não menos de 50 anos (DGNB, 2022).

Dependendo do tipo específico de construção, a avaliação pode abranger até 40 critérios de sustentabilidade, todos os quais são regularmente reavaliados e desenvolvidos por um painel independente de especialistas. Dependendo do grau em que um edifício atende a esses critérios aferidos pelo “Índice de Desempenho” DGNB, é atribuída a um edifício uma classificação Ouro, Prata ou Bronze.

A certificação deve dar uma contribuição essencial para a qualidade em todos os aspectos do planejamento, construção, uso e manutenção. Ao reduzir o risco e os custos associados a ele, a aplicação do Sistema DGNB ajuda a adequar os projetos de construção às

necessidades do futuro. Uma parte importante disso é o processo de certificação independente, que agrega transparência aos controles de qualidade. O Certificado DGNB é concedido em Ouro, Prata ou Bronze, podendo ser utilizado também como instrumento de premiação e marketing (DGNB, 2022).

A classificação final do DGNB é pelo Índice de Desempenho Total; este fator define a classificação final, e terá de cumprir valores mínimos de Índice de Desempenho Nominal para as 5 primeiras categorias tratadas no sistema de avaliação respectivo, como demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 Níveis de classificação e respectivos requisitos exigências do sistema de avaliação DGNB

Índice de Desempenho Total Mínimo	Índice de Desempenho Nominal Mínimo das 5 Primeiras Categorias	Classificação DGNB
50%	35%	Bronze
65%	50%	Prata
80%	65%	Ouro

Fonte: (MORAES, 2013, página 90)

Como resultado, a certificação sempre considera todo o ciclo de vida de um projeto, não apenas no que diz respeito aos impactos no meio ambiente e consumo de recursos, mas também no que diz respeito ao custo de gerenciamento ou operação de uma edificação, bem como gastos com manutenção. As avaliações giram em torno de três fatores centrais de sustentabilidade, de mesmo peso: fatores ecológicos, econômicos e socioculturais. O Sistema DGNB também avalia o desempenho geral de um empreendimento e não apenas medidas individuais (DGNB, 2022).

2.2.8 Metodologia AQUA (Alta Qualidade Ambiental)

A Alta Qualidade Ambiental (AQUA) é uma metodologia de desempenho ambiental que visa determinar a qualidade ambiental de um empreendimento novo ou reabilitado. É baseado na certificação francesa *High Quality in Environment* (HQE). Foi traduzida e adaptada para a realidade brasileira em 2007 pela Fundação Vanzolini, em parceria com o Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e com o *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (OLIVEIRA, 2011).

A metodologia AQUA-HQETM detalha uma certificação internacional da construção de alta qualidade ambiental, desenvolvida a partir da renomada certificação francesa

Démarche HQE™ e aplicada no Brasil exclusivamente pela Fundação Vanzolini (VANZOLINI, 2022).

A Fundação Vanzolini passa a ser a representante no Brasil da rede de certificação HQE e o Processo AQUA transforma-se em AQUA-HQE, uma certificação com identidade e reconhecimento internacional (VANZOLINI, 2022).

A certificação brasileira é dividida em duas categorias: Sistema de Gestão do Empreendimento (SGE), que define o perfil desejado para a construção e fiscaliza seu cumprimento até a finalização do projeto, e Qualidade Ambiental do Edifício (QAE) (OLIVEIRA, 2011).

De forma concisa, o SGE faz exigências quanto ao sistema de gestão de empreendimentos, a GAE (Gestão Ambiental do Empreendimento) discorre sobre requisitos do sistema de gestão do uso e operação da edificação, enquanto a QAE agrupa as premissas de avaliação de desempenho ambiental da edificação, objeto da certificação, agrupando-as em 14 categorias (VANZOLINI, 2022). A Tabela 5 demonstra as categorias avaliadas pela metodologia.

Tabela 5 Categorias avaliadas pelo AQUA

Impactos Ambientais Externos	MEIO AMBIENTE
	1- Relação do edifício com o seu entorno
	2- Escolha Integrada de produtos, sistemas e processos construtivos
	3- Canteiro de obras com baixo impacto ambiental
	ENERGIA
	4 - Gestão da Energia
	5- Gestão da água
Espaço Interior Sadio e Confortável	6- Gestão dos resíduos de uso e de operação do edifício
	7- Manutenção – permanência do desempenho ambiental
	CONFORTO
	8- Conforto higrotérmico
	9- Conforto acústico
	10 – Conforto Visual
	11 Conforto Olfativo
	SAÚDE
12 – Qualidade sanitária dos ambientes	
13 – Qualidade sanitária do ar	
14 – Qualidade sanitária da água	

Fonte: adaptado de (OLIVEIRA, 2011, página 53)

A atribuição do certificado está vinculada à obtenção de um perfil mínimo referente às categorias. Para cada critério técnico avaliado em cada uma das 14 categorias, são definidos quatro níveis de desempenho: Melhores Práticas (MP), Boas Práticas (BP), Base (B, nível de entrada da certificação AQUA), Não-conforme (NC, quando o nível B não for atingido) (VANZOLINI; CERTIVÉA, 2021).

O certificado compreende 4 temas: Meio ambiente, Energia, Saúde e Conforto. Cada tema é avaliado em uma escala de 1 a 5 estrelas. O nível global do Certificado HQE é avaliado em cinco classificações possíveis, dependendo da pontuação global alcançada a partir do total de estrelas obtido em cada um dos 4 temas com 16 estrelas, no máximo (VANZOLINI; CERTIVÉA, 2021). Para atingir a classificação “excepcional”, independentemente do número de estrelas obtido, é preciso alcançar, no tema Energia, um nível equivalente a 3 estrelas. A Tabela 6 demonstra os níveis de certificação e a quantidade de estrelas necessárias.

Tabela 6 Nível global do certificado HQE

Nível Global	Níveis mínimos a serem alcançados
HQE Iniciado	4 estrelas
HQE Bom	Entre 5 e 8 estrelas
HQE Muito Bom	Entre 9 e 12 estrelas
HQE Excelente	Entre 13 e 15 Estrelas
HQE Excelente e Avançado	16 estrelas ou mais

Fonte: (VANZOLINI; CERTIVÉA, 2021, página 11)

Em termos metodológicos, a certificação AQUA funciona de forma parecida ao sistema original francês, mudando apenas alguns parâmetros de exigência das categorias. É no tratamento desses parâmetros que se percebe o trabalho de adaptação, ou tropicalização, como é comumente conhecido (SILVA, 2014).

2.2.9 Ferramenta ASUS (Sistemas de Avaliação de Sustentabilidade)

A ferramenta ASUS é um projeto financiado pelo Governo Estadual do Espírito Santo, Brasil, por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo - FAPES. A metodologia foi desenvolvida inicialmente em 2008, tendo como alicerce conceitual uma revisão da metodologia SBTool, no esforço em adaptá-la às condições regionais particulares, com ênfase para projetos de edifícios públicos e institucionais do Espírito Santo (ASUS, 2015).

Nesse sentido, a ferramenta ASUS tem por objetivo propor um sistema adequado ao contexto do Espírito Santo, em seus aspectos ambiental, social, econômico e cultural para avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios em fase de projeto, servindo como instrumento de auxílio aos projetistas que visam à proposição de edificações mais sustentáveis.

A avaliação em si é realizada por meio de plataforma online onde os critérios são apresentados sucintamente, com seus objetivos, recomendações e marcas de referência. Para cada critério, com base nas marcas de referências definidas, o usuário/avaliador marca a opção correspondente ao nível de desempenho alcançado no projeto e o próprio sistema realiza os cálculos e ponderações para apresentação do resultado final.

A estrutura geral da ferramenta ASUS é dividida em seis temas. Cada tema é subdividido em categorias, num total de dezoito, sendo algumas dessas divididas em subcategorias, de acordo com a complexidade da temática. As categorias e subcategorias organizam os grupos de critérios, que são um total de setenta e nove, conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 Estrutura e hierarquia da ferramenta ASUS.

TEMA	CATEGORIA	SUBCATEGORIA	CRITÉRIOS
A. PLANEJAMENTO DO EMPREENDIMENTO	A1. Seleção do sítio e planejamento do empreendimento		07 critérios
	A2. Interrelação urbana e desenvolvimento do sítio		06 critérios
B. CONSUMO DE RECURSOS	B1. Energia	Fontes de energia	02 critérios
		Eficiência energética	05 critérios
	B2. Materiais		01 pré-requisito 10 critérios
B3. Água		03 pré-requisitos 03 critérios	
C. QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO	C1. Qualidade do ar interno		01 pré-requisito 04 critérios
	C2. Ventilação		02 critérios
	C3. Desempenho térmico		02 critérios
	C4. Conforto visual	Luz natural	03 critérios
		Luz artificial	03 critérios
	C5. Conforto acústico	Isolamento	03 critérios
Absorção		01 critério	
D. QUALIDADE DOS SERVIÇOS	D1. Funcionalidade e flexibilidade		03 critérios
	D2. Planejamento para operação		06 critérios
E. CARGAS AMBIENTAIS	E1. Emissões atmosféricas		01 critério
	E2. Resíduos sólidos		03 critérios
	E3. Águas pluviais e residuais		02 critérios
	E4. Impactos no terreno e entorno		04 critérios
F. ASPECTOS SOCIAIS, CULTURAIS E ECONÔMICOS	F1. Aspectos sócio-econômicos		03 critérios
	F2. Aspectos culturais		06 critérios
Total			05 pré-requisitos 79 critérios

Fonte: (ASUS, 2015)

O sistema de pontuação adotado pela ASUS foi desenvolvido a partir do sistema proposto pela SBTool, uma ferramenta idealizada por um consórcio de países (iiSBE, International Initiative for a Sustainable Built Environment), com o objetivo de servir de base para sistemas de avaliação de edifícios após as devidas adaptações regionais.

O documento que fundamenta a avaliação, denominado Referencial Teórico da Ferramenta ASUS (LPP/UFES, 2015), desenvolvida no âmbito do Laboratório de Planejamento e Projetos LPP/UFES, apresenta cada critério conforme a estrutura indicada na Tabela 8.

Tabela 8 Estrutura de apresentação dos critérios

TÓPICO	CONTEUDO
CONCEITUAÇÃO	Apresenta os conceitos adotados para o estabelecimento do critério e, eventualmente, sua abrangência
OBJETIVO	Estabelece claramente o que se pretende com o atendimento ao critério
JUSTIFICATIVA	Apresenta as relações entre o critério e o conceito de sustentabilidade, bem como as eventuais explicações justificativas de sua adoção
RECOMENDAÇÕES, DIRETRIZES E ESTRATÉGIAS	Propõe alternativas a serem consideradas pelo projetista na proposição de soluções em relação ao critério específico
PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO	Indica como deve ser feita a verificação do atendimento ao critério
FONTE DE DADOS	Lista os documentos a serem considerados para comprovação do atendimento ao critério
MARCAS DE REFERÊNCIA	Indicam os quatro níveis de classificação de desempenho, podendo eventualmente serem reduzidos para dois, quando as possíveis respostas são do tipo sim ou não
PESO	Indica o peso ou importância do critério. Em algumas situações – como na não aplicação de um aspecto específico – o peso é automaticamente alterado

Fonte: (ASUS, 2015)

A ferramenta ASUS, adaptada para o Brasil, avalia o desempenho do edifício em categorias e subcategorias ambientais, atribuindo uma escala com os níveis de pontuação de -1, 0, +3 ou +5, embora alguns dos critérios não contemplem os níveis intermediários de desempenho. Para cada critério, esses níveis estão definidos nas denominadas marcas de referência.

- Prática negativa (-1), não atende ao desempenho mínimo esperado;
- Desempenho mínimo (0), corresponde às normas, à legislação ou à prática convencional;
- Desempenho bom (+ 3);
- Prática de excelência (+5).

As marcas de referência são requisitos preestabelecidos no Referencial Teórico da Ferramenta ASUS (LPP/UFES, 2015) para atribuição das pontuações. Como exemplo, o item A1.4, referente à proximidade do sítio ao transporte público, com peso 1,41%, define os requisitos como:

- Nível -1: A distância entre a entrada principal do empreendimento e o ponto de parada de transporte público mais próximo é maior que 500m;
- Nível 0: A distância entre a entrada principal do empreendimento e o ponto de parada de transporte público mais próximo é de, no máximo, 500m;
- Nível +3: A distância entre a entrada principal do empreendimento e o ponto de parada de transporte público mais próximo é de, no máximo, 250m;
- Nível +5: A distância entre a entrada principal do empreendimento e o ponto de parada de transporte público mais próximo é de, no máximo, 100m.

O objetivo do item A1.4 é estimular o uso do transporte coletivo em detrimento do uso do automóvel particular, fazendo com que o deslocamento de pessoas até o local auxilie na redução ou não aumento do número de automóveis particulares circulantes no meio (LPP/UFES, 2015).

Considerando que diferentes ações refletem diferentes impactos, com graus de importância específicos relativos também ao contexto em que se aplicam, cada critério possui um peso. Dessa forma, a nota referente ao desempenho em cada critério é multiplicada pelo peso específico de cada um, e o desempenho final é o resultado da média ponderada de todos os critérios de avaliação (LPP/UFES, 2015).

No final do processo, é apresentado o resumo da avaliação com os níveis de desempenho alcançados em cada tema, suas respectivas ponderações e a média final. Além disso, o resultado é apresentado graficamente de duas maneiras: 1. um gráfico do tipo radar que demonstra o nível de desempenho alcançado em cada tema; e 2. um gráfico em colunas, onde as 6 primeiras representam a contribuição efetiva de cada tema na avaliação final, com seus respectivos resultados ponderados, e a última coluna demonstra o resultado final da avaliação.

A partir da escala de graduação de desempenho da ferramenta, foram definidos níveis intermediários para o resultado final da avaliação do edifício, conforme Tabela 9.

Tabela 9 Escala de graduação do desempenho final

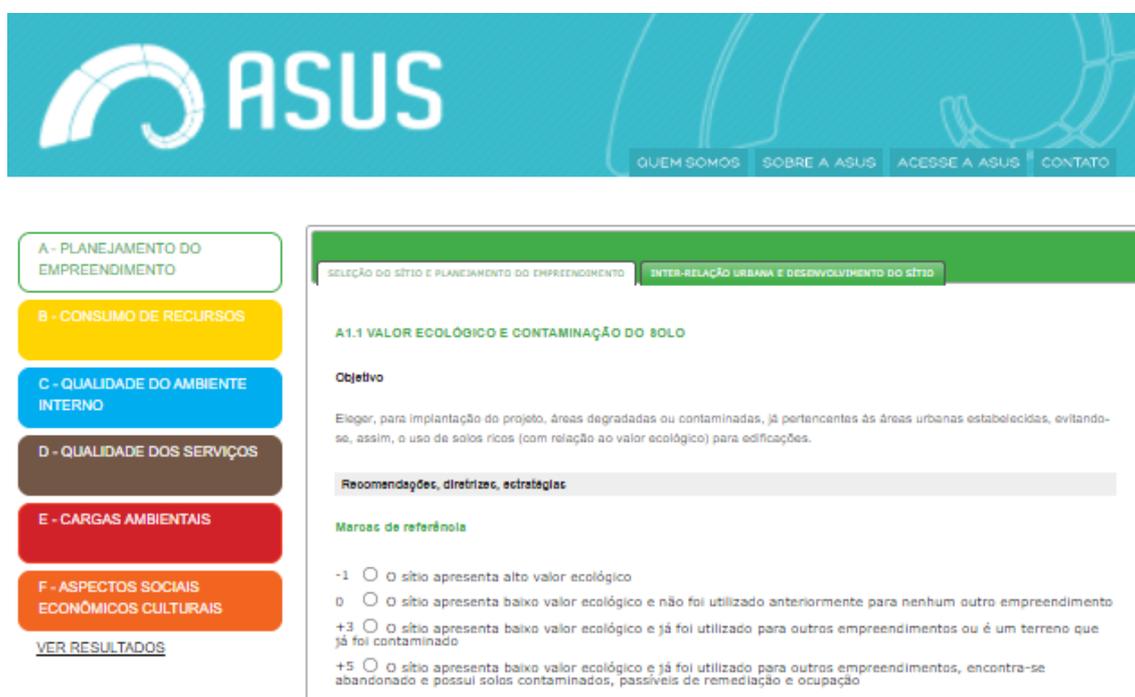
Índice obtido	Desempenho
-1 a 0	Desempenho ruim

0 a 1	Desempenho mínimo esperado
1 a 2	Desempenho bom
3 a 4	Desempenho Superior
4 a 5	Prática de excelência

Fonte: (ASUS, 2015)

A proposta da ASUS é de ser uma ferramenta livre, cujo conteúdo é público e gratuito, destacando-se que sua adoção não pressupõe uma certificação. A ferramenta ASUS foi formulada para ser adotada, principalmente, enquanto instrumento de orientação a arquitetos, engenheiros, projetistas e construtores, podendo ser acessada e utilizada em <https://asus.lpp.ufes.br/ferramenta.php>, conforme demonstra a Figura 8.

Figura 8 Ferramenta ASUS web



Fonte: <https://asus.lpp.ufes.br/ferramenta.php>

Considerando que o processo de projeto pode levar meses, é aconselhável utilizar o documento Referencial Teórico da Ferramenta ASUS (LPP/UFES, 2015) tanto para uma melhor familiarização com a ferramenta, como para considerar as recomendações nele contidas desde a etapa inicial de concepção.

Destaca-se que muitos critérios não seguem uma ordem cronológica de projeto, tendo sido elaborados por temática, exigindo assim que o usuário conheça o seu conteúdo para alcançar melhores resultados (ASUS, 2015).

2.2.10 European Committee for Standardization EN 15804:2013+A2:2019 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.

A Norma Europeia EN 15804 faz parte de um conjunto de normas para a avaliação da sustentabilidade na construção tanto no contexto de materiais ou componentes da construção civil, como também no contexto do edifício como um todo.

Em 21 de junho de 2019, foi realizada uma revisão substancial desta norma, aprovada pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN). De acordo com a norma EN 15804:2013+A2:2019 revisada, as Declarações Ambientais de Produto (DAPs) estão mais alinhadas com a Pegada Ambiental do Produto da Comissão Europeia. Essa revisão da norma Europeia EN 15804:2013+A2:2019 define como as empresas devem criar as DAPs no setor da construção civil.

A Norma Europeia EN 15804:2013+A2:2019 revisada é a norma chave para especificar a Declaração Ambiental de Produto (DAP), e pode ser considerada a norma mais importante em um grupo de seis normas europeias relacionadas à sustentabilidade do meio ambiente construído, sendo parte de um conjunto de normas para a avaliação da sustentabilidade das obras de construção tanto ao nível do produto como ao nível do edifício. Esse conjunto de normas inclui:

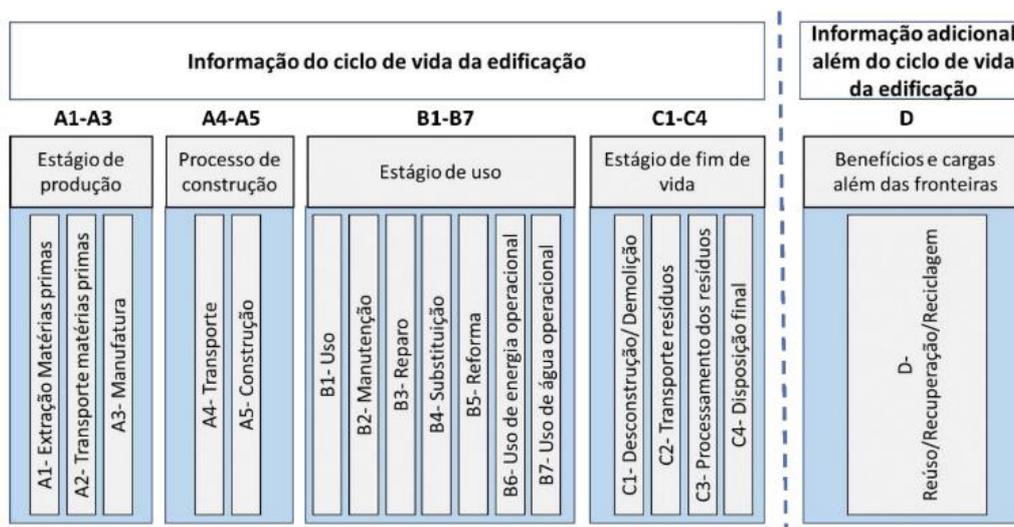
- EN 15643-1, *Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 1: General framework;*
- EN 15643-2, *Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2: Framework for the assessment of environmental performance;*
- EN 15978, *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method;*
- CEN/TR 15941, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Methodology for the selection and use of generic data;*
- EN 15942, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Communication formats: business to business.*

A norma europeia EN 15804 (CEN, 2012) fornece as regras para categoria de produtos para todos os serviços da construção, e uma estrutura para assegurar que todas as informações que advêm da avaliação do ciclo de vida do produto da construção civil, como materiais, serviços e processos, são verificadas e contempladas (BRE GROUP, 2012).

Segundo a EN 15804 (CEN, 2012), o objetivo da norma é fornecer informação ambiental quantificada para um produto ou serviço da construção em uma base científica e harmonizada. Também fornece informações da saúde relacionadas às emissões do ar interno, solo e água durante a etapa de uso da edificação. O propósito de uma Declaração Ambiental de Produto no setor da construção é fornecer a base para avaliação de edificações e outros tipos de construções e, assim, identificar as edificações que causam menos impacto ao meio-ambiente (BRE GROUP, 2012).

A norma europeia EN 15804 (CEN, 2012), que trata especificamente da ACV de produtos da construção civil, divide as etapas do ciclo de vida de uma edificação em módulos conforme Figura 9.

Figura 9 Principais etapas do ciclo de vida de uma edificação de acordo com a EN 15804 (CEN, 2012)



Fonte: (CALDAS; CARVALHO; TOLEDO FILHO, 2020a)

Dentro da abordagem modular Europeia, a Norma Europeia EN 15804:2013+A2:2019 revisada determina que todos os produtos e materiais de construção têm agora de declarar os módulos A1 a A3, C1 a C4 e D. Só em condições muito específicas ainda é possível fazer uma avaliação DAP do berço ao portão (A1-A3) (PAPADOPOULOU et al., 2021). Em todos os outros casos, o fim da vida útil e, mais especificamente, os benefícios da

reciclagem em fim de vida precisam ser incluídos. Como muitos DAPs atualmente não levam em consideração todos os módulos, a revisão significará trabalho adicional para muitas pessoas (CASCIONE et al., 2022).

O ciclo de vida de um produto é diferente conforme as fronteiras do sistema. Neste caso, a avaliação do ciclo de vida cobre a etapa de uso, instalação até a edificação, uso e manutenção, substituições, demolição, processamento de resíduos para reuso, recuperação e reciclagem. Assim, a avaliação é dita como sendo “berço ao túmulo” e fornece uma Declaração Ambiental de Produto referente aos produtos da construção baseada em uma ACV, ou seja, cobrindo todas as informações dos módulos A1 ao D (DURÃO et al., 2020).

A metodologia da EN 15804 para avaliação da sustentabilidade de edifícios é aplicada por módulos, o que permite a expressão e organização dos dados através do ciclo de vida dos edifícios ou materiais de construção. A abordagem requer que os dados fundamentais sejam consistentes, reproduzíveis e comparáveis; desta forma, os potenciais impactos ambientais que ocorrem ao longo do ciclo de vida do edifício são atribuídos ao estágio em que ocorrem, conferindo transparência aos resultados de análises (FISCHER, 2020).

2.2.11 Metodologia ISMAS (Instrumento para a Seleção de Materiais Mais Sustentáveis)

A metodologia ISMAS nasceu como resultado de uma proposta de Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura, Construção e Design da Universidade do Bío-Bío, Chile, em 2014, realizada pela Dra. Márcia Bissoli Dalvi.

O propósito principal da metodologia ISMAS foi desenvolver um instrumento para auxiliar na escolha de materiais à luz da sustentabilidade que fosse prático e acessível ao conhecimento teóricos do usuários (arquitetos, engenheiros, construtores e pesquisadores), de fácil acesso e gratuito (DALVI, 2014).

A metodologia ISMAS utiliza 7 categorias/critérios para avaliar a sustentabilidade dos materiais; avalia características consideradas desejáveis que se relacionam com os temas da economia de matérias-primas e da geração e gestão dos resíduos, inseridos no contexto

da sustentabilidade ambiental da construção civil (DALVI, 2014). A Tabela 10 demonstra as categorias avaliadas.

Tabela 10 Categorias/critérios da metodologia ISMAS

CATEGORIAS/ CRITÉRIOS		
Economia de Matérias primas	1	A durabilidade independe de manutenção
	2	É possível ser reaproveitado, no todo ou em parte
	3	É renovável
	4	Dispensa materiais adicionais para acabamento
	5	Possui elementos reciclados
Geração e gestão de resíduos	6	Favorece a desmontagem visando o reaproveitamento
	7	Favorece a baixa geração de resíduos

Fonte: (DALVI, 2014, página 116)

Considerando que os critérios de avaliação de sustentabilidade para a metodologia ISMAS possuem importâncias diferenciadas, foram adotadas marcas de referências para cada critério, e uma escala gráfica de valores de desempenho ambiental.

As ferramentas com base em critérios são definidas como um sistema de atribuição de valores (ou pontos) associados a uma definição, que visa à escolha de uma resposta dentro de uma escala pré-determinada. Para a avaliação ambiental são considerados sistemas abrangentes, por apresentarem parâmetros que visam à redução do impacto ambiental em proporções crescentes, conforme são melhorados os benefícios atingidos (DALVI, 2014).

Uma limitação para a escolha de escalas está relacionada à forma como o usuário as interpretará. Dessa maneira, emerge a necessidade de tornar as marcas de referência de fácil entendimento, para que a interpretação seja facilitada.

A metodologia ISMAS utiliza uma pontuação em cada critério; numericamente, os valores são atribuídos a três possíveis níveis de resposta. Cada nível apresenta uma estratégia e está vinculado a um determinado valor numérico, conforme demonstra a Figura 10.

Figura 10 Escala de graduação para a avaliação de cada critério no ISMAS



Fonte: (DALVI, 2014, página 117)

Quando o material não atinge minimamente os objetivos do critério, representa a prática negativa, e recebe a pontuação -1. Ao atingir a prática padrão (nível 0), o material está cumprindo minimamente com a situação ideal, sendo considerada como a referência ou boas práticas. Ao alcançar melhores níveis de desempenho, impulsiona os objetivos a serem atingidos e recebe a nota +1, sendo considerada uma prática positiva.

Em geral, tanto os critérios como as respectivas marcas de referência buscam valorizar as características dos materiais que os aproximam dos conceitos sustentáveis. A definição do critério reaproveitar, por exemplo, significa prolongar a vida útil do material.

A metodologia ISMAS utiliza marcas de referências como um padrão de níveis; quanto maior a necessidade de processamento industrial para o reaproveitamento, menos sustentável se torna. A Figura 11 apresenta as marcas de referência do critério 1.

Figura 11 Marcas de referência do critério 1

Critério 1: É possível ser reaproveitado, no todo ou em parte			
Nível	Marcas de referências	Observações	Exemplos
-1	Não atendimento ao requisito mínimo estabelecido para o nível 0	Alguns materiais não viabilizam o reaproveitamento por características próprias do mesmo	gesso
0	É possível ser reaproveitado, contudo requer processamento industrial	É possível ser reaproveitado, porém, o processamento industrial demanda alto consumo energético, além de necessitar de processos de transformação para ser reutilizado como material de construção novamente	perfil de alumínio
1	É possível ser reaproveitado com mínimo processamento ou de forma direta, sem processamento	O material que requer processamento mínimo está relacionado também ao baixo consumo energético. O material também pode ser reaproveitado diretamente	revestimentos cerâmicos, porta de alumínio

Fonte: (DALVI, 2014, página 119)

A adoção de pesos contribui para indicar a maior ou menor importância relativa dos critérios em relação ao contexto. Os pesos são atrelados aos objetivos do projeto e à importância de cada critério (BISSOLI et al., 2016). A metodologia ISMAS define os pesos de cada critério em valores numéricos em uma escala gradual como demonstra a Figura 12.

Figura 12 Parâmetros conceituais adotados para definição dos pontos atribuídos

Parâmetros considerados	Definição
Abrangência do critério para impulsionar a sustentabilidade	Destaca a importância do critério para contribuir e impulsionar a sustentabilidade. Foram consideradas 3 possibilidades de respostas: Muito abrangente, abrangência média e pouco abrangente. Para a maior pontuação, representada pelo valor 6, foi considerado que este deveria ser superior à metade da somatória de pontos totais, que podem atingir o valor 10. Para os outros dois parâmetros, o valor restante foi dividido igualmente. O valor definido para pouco abrangente foi 0,5, pois se considera que, minimamente, os critérios impulsionam a sustentabilidade.
Complexidade para avaliar o critério	Avalia a facilidade ou não de uso dos critérios e os mesmos são julgados com 3 possibilidades de respostas: complexidade alta (2), média (1) ou baixa (0). Quanto mais complexo para avaliar, mais alta é a nota.
Impacto do critério sobre o meio ambiente	Analisa o impacto de forma positiva, ou seja, a atuação do critério para a redução de impactos adversos. Os critérios podem ser julgados com 3 possibilidades de respostas: impacto alto (2), médio (1) ou baixo (0).

Fonte: (DALVI, 2014, página 125)

Para o cálculo, os valores atribuídos a cada critério são somados, podendo-se atingir o máximo de 10 pontos se atenderem à resposta de maior pontuação em todos os parâmetros, conforme apresentado na Figura 13.

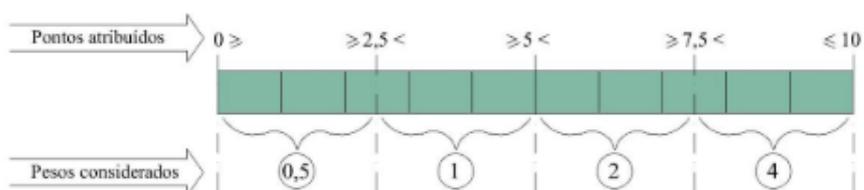
Figura 13 Pontos atribuídos aos critérios com base nos parâmetros adotados

Critério	Abrangência do critério para impulsionar a sustentabilidade			Complexidade para avaliar o critério			Impacto do critério sobre o meio ambiente			Pontos atribuídos
	6	3	0,5	2	1	0	2	1	0	
	Muito abrangente	Abrangência a média	Pouco abrangente	Alta	Média	Baixa	Alto	Médio	Baixo	
1		3				0		1		4
2	6				1		2			9
3			0,5			0			0	0,5
4	6					0		1		7
5		3			1				0	4
6			0,5			0		1		1,5
7		3				0	2			5

Fonte: (DALVI, 2014, página 125)

Com a soma dos pontos atribuídos, o valor é ajustado para a concordância de pesos apresentada conforme Figura 14. A título de exemplo, se o somatório obtiver como resultado o valor 3,5, então o peso final a ser considerado para este critério será 1.

Figura 14 Escala de ajuste dos pontos atribuídos para os pesos



Fonte: (DALVI, 2014, página 126)

Para a definição dos pesos na metodologia ISMAS, com variação de 0,5 a 4, é levada em consideração a progressão geométrica (Equação 1), caracterizada por uma sequência numérica em que cada termo, a partir do segundo, é igual ao produto do anterior, multiplicado por uma constante.

$$a_n = a_1 \cdot q^{n-1} \quad \text{Equação 1}$$

Fonte: (DALVI, 2014, página 126)

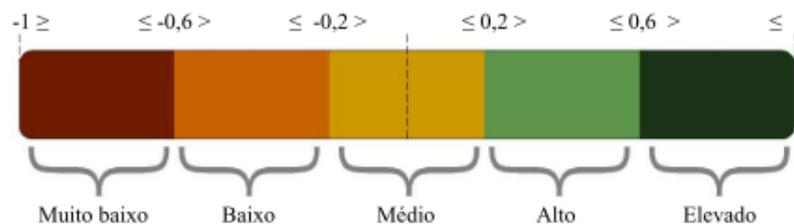
Por fim, por meio de média ponderada (Equação 2), o sistema de pontuação converte os valores numéricos das marcas de referência e dos pesos em uma pontuação final, chegando-se a um valor que determina, a partir de uma escala previamente elaborada, o denominado “índice de sustentabilidade” atingido pelo material.

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{(P_i \cdot N_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Fonte: (DALVI, 2014, página 127)

O índice de sustentabilidade atingido pelo material é classificado pela escala de qualificação para a metodologia ISMAS conforme Figura 15, com variações que percorrem os valores de -1 a 1, e associado a uma escala de cores representativas.

Figura 15 Possíveis resultados do índice de sustentabilidade propostos pelo ISMAS



Fonte: (DALVI, 2014, página 131)

Baseado nesse conceito foi desenvolvida uma representação gráfica para a metodologia ISMAS e que permite a rápida apreensão do resultado, bem como o estabelecimento de uma identidade visual (BISSOLI et al., 2017), como demonstra Figura 16.

Figura 16 Representação visual do índice de sustentabilidade do material pelo ISMAS

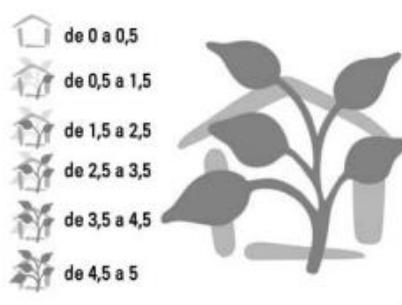


Fonte: (DALVI, 2014, página 131)

Como resultado da metodologia ISMAS temos uma representação gráfica associada também a uma escala de cores, para que os resultados sejam expressos de forma mais facilmente compreensível.

A representação do desempenho ambiental proposto pela metodologia ISMAS corresponde a uma representação de folhas sustentáveis, como demonstra Figura 17.

Figura 17 O número de folhas representa o grau de sustentabilidade atingido na Ferramenta Verde



Fonte: (MACÍAS; NAVARRO, 2010, página 100)

2.2.12 Ferramenta SIDAC (Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção)

O Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) é uma ferramenta desenvolvida pelo Ministério de Minas e Energia (MME) do Brasil para avaliar o desempenho ambiental de edifícios e materiais da construção civil (BELIZARIO-SILVA et al., 2022a).

Segundo Belizario-Silva, et al., (2022a) o SIDAC permite realizar comparações entre produtos, da mesma categoria de produto, comparando fornecedores diferentes e também comparando um produto específico a um produto genérico, como forma de estabelecer um benchmark para o desempenho ambiental do produto avaliado.

O SIDAC permite mensurar indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A primeira versão do SIDAC contempla os indicadores de demanda de energia primária e emissão de CO₂ do berço ao portão da fábrica. Desta forma, os indicadores tratam das etapas iniciais do ciclo de vida das construções, considerando os módulos de informação padronizados pela norma europeia EN 15978 (DIN, 2012), conforme Figura 18.

Figura 18 Etapas do ciclo de vida de uma edificação, considerando os módulos de informação padronizados pela norma europeia EN 15978 (DIN, 2012). A primeira versão do SIDAC apresenta indicadores agregados para as etapas A1-A3 - Produto (do berço ao portão)

Informação do ciclo de vida da edificação														Informações além do ciclo de vida da edificação
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Produto			Construção		Uso					Fim de vida				Benefícios e impactos além da fronteira do sistema
Extração de matérias-primas	Transporte	Produção dos materiais	Transporte	Construção (obra)	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Renovação	Desconstrução / demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Disposição final	Potencial de reuso / recuperação / reciclagem
					B6 Uso operacional de energia									
1ª versão do Sidac														

Fonte: (BELIZARIO-SILVA, et al., 2022, pagina 3)

A primeira versão do SIDAC contém dados de 40 insumos básicos e 86 produtos de construção, divididos em 12 categorias de produto que perfazem cerca de 90% da massa de produtos de construção comercializados no Brasil (BELIZARIO-SILVA et al., 2022b).

Segundo Belizario-Silva, et al., (2022a), futuramente, o SIDAC poderá ser expandido para incluir o cálculo de outros indicadores de desempenho ambiental, como a demanda de materiais, a demanda de água e geração de resíduos sólidos.

O objetivo do SIDAC é fornecer uma avaliação objetiva e sistemática do desempenho ambiental de um edifício ou materiais construtivos, a partir da coleta de dados sobre seu consumo de água, energia e uso de materiais, bem como sua geração de resíduos e emissões de gases de efeito estufa. Com base nesses dados, o sistema atribui uma pontuação para o desempenho ambiental do edifício ou material avaliado, permitindo compará-lo com outros similares.

O SIDAC é uma ferramenta importante para promover a sustentabilidade na construção civil, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis e a melhoria contínua do desempenho ambiental dos edifícios e materiais da construção. Além disso, o sistema também fornece informações valiosas para os consumidores, permitindo que eles escolham produtos e serviços mais sustentáveis e responsáveis do ponto de vista ambiental.

O SIDAC utiliza critérios de sustentabilidade para avaliar o desempenho ambiental de edifícios e materiais da construção civil. Esses critérios são agrupados em quatro áreas principais:

- Gestão de energia: avalia o consumo de energia do edifício ou empreendimento e a eficiência energética de seus sistemas de iluminação, climatização e outros equipamentos.
- Gestão de recursos hídricos: avalia o consumo de água do edifício ou empreendimento e a eficiência de seus sistemas de captação, armazenamento e distribuição de água.
- Gestão de materiais: avalia o uso de materiais sustentáveis e a eficiência do processo de construção, incluindo a minimização do desperdício de materiais e a reciclagem de resíduos.
- Gestão de resíduos: avalia a gestão de resíduos gerados pelo edifício ou empreendimento, incluindo a minimização da geração de resíduos, a segregação adequada dos materiais recicláveis e a destinação correta dos resíduos.

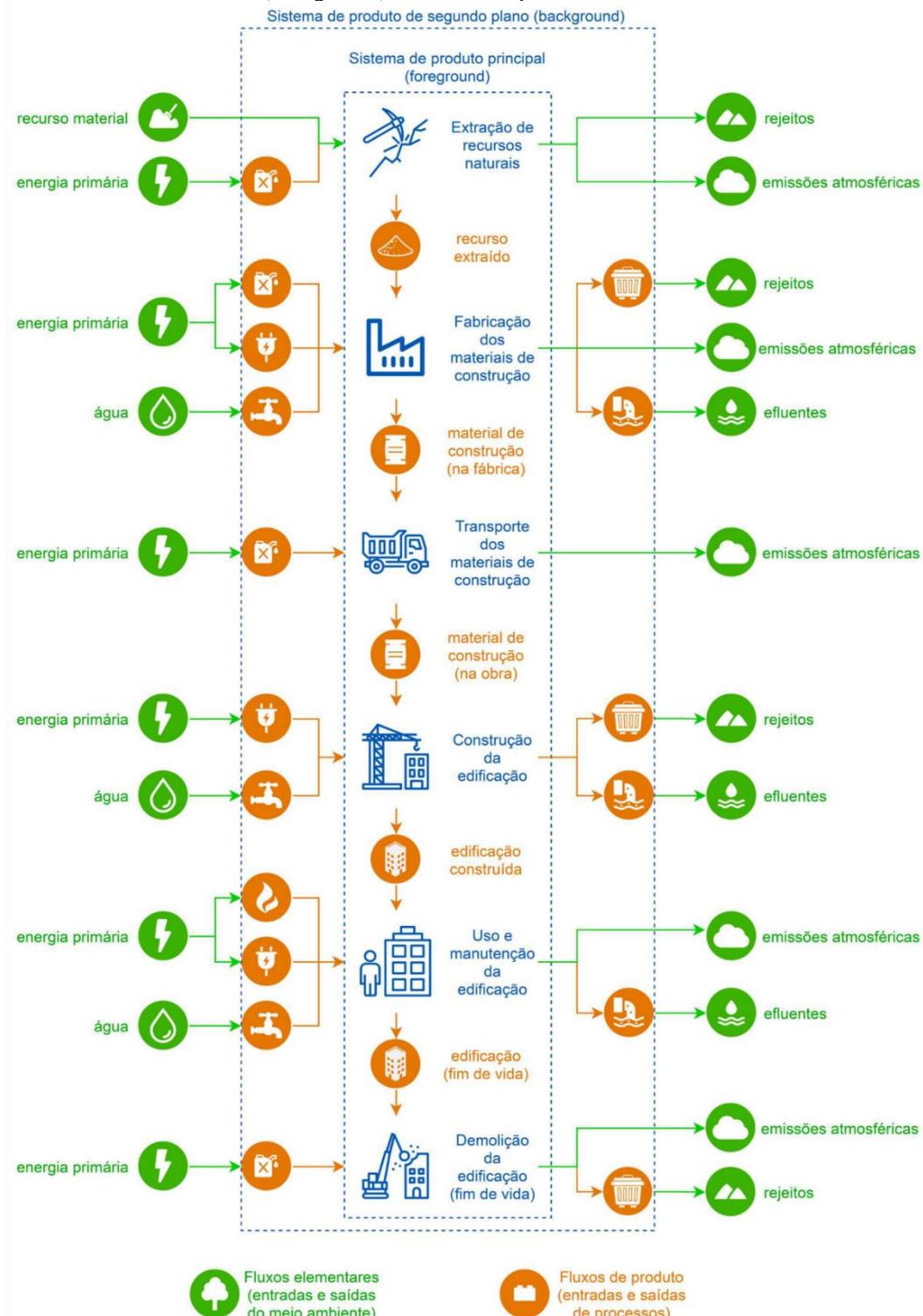
O SIDAC pode ser aplicado em diferentes tipos de edifícios e materiais da construção civil, desde residências até edifícios comerciais, industriais e públicos. Ele pode ser usado tanto por construtoras e incorporadoras na fase de projeto e construção, quanto por proprietários e gestores de edifícios já existentes, visando a melhoria contínua do desempenho ambiental (BELIZARIO-SILVA et al., 2022a).

Segundo Belizario-Silva, et al., (2022a) o SIDAC pode fornecer informações para diversas decisões que determinam o desempenho ambiental de uma construção, tais como: definição do partido arquitetônico de um empreendimento, análise de opções de projeto estrutural, seleção de componentes ou sistemas construtivos, seleção dos fornecedores dos materiais de construção.

A aplicação do SIDAC permite que as construtoras e incorporadoras identifiquem práticas mais sustentáveis e eficientes, reduzindo os impactos ambientais de seus empreendimentos e aumentando sua competitividade no mercado. Já os proprietários e gestores de edifícios podem utilizar o SIDAC para identificar oportunidades de redução de custos e melhorias na eficiência dos sistemas de energia, água e gestão de resíduos.

Os fluxos elementares do inventário do ciclo de vida do material da construção são convertidos em indicadores de desempenho ambiental, como demonstra a Figura 19.

Figura 19 Representação esquemática simplificada do sistema de produto de uma edificação, do berço ao túmulo, com o sistema de primeiro plano (foreground), o sistema de segundo plano (background), os fluxos de produto e fluxos elementares



Fonte: (BELIZARIO-SILVA, et al., 2022, página 5)

O Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) avalia o uso de materiais sustentáveis da construção civil levando em consideração diversos critérios. Esses critérios incluem:

- Origem dos materiais: é avaliado o uso de materiais regionais e de fontes renováveis ou recicladas.
- Impacto ambiental da produção dos materiais: é avaliado o impacto ambiental da produção dos materiais, incluindo o uso de energia e a emissão de gases de efeito estufa.
- Qualidade dos materiais: é avaliada a qualidade dos materiais utilizados, incluindo sua durabilidade e resistência.
- Eficiência do uso dos materiais: é avaliada a eficiência no uso dos materiais durante o processo de construção, incluindo a minimização do desperdício e a utilização de materiais reaproveitados ou reciclados.
- Reciclagem e reutilização de materiais: é avaliado o potencial de reciclagem e reutilização dos materiais após o fim de vida útil do edifício ou empreendimento.

Esses critérios são avaliados de acordo com sua importância para a sustentabilidade da construção civil, o SIDAC leva em conta o desempenho em cada um desses critérios. A avaliação dos materiais é fundamental para a promoção da sustentabilidade na construção civil, pois o uso de materiais sustentáveis pode reduzir o impacto ao meio ambiente.

2.2.13 Análise Comparativa das Metodologias

A eficiência do ambiente construído, somada à identificação e comunicação do desempenho ambiental da edificação ou de partes dela, elevou a conscientização, e, desta forma, novos critérios e padrões foram estabelecidos. Como resultado destes novos padrões e critérios para o ambiente construído, juntamente com os critérios de seleção dos consumidores, estimularam-se esforços das partes interessadas (*stakeholders*) a produzir edifícios com desempenho ambiental cada vez mais elevados e eficientes.

As metodologias para avaliação do desempenho das edificações possuem diretrizes que servem de assistência ao projetista, sendo que este pode usufruir de muitas informações e estratégias. De uma forma geral, os assuntos abordados são agrupados em áreas temáticas diversas, como planejamento, consumo de recursos, cargas ambientais, uso de

resíduos e uso de novas tecnologias, o que contribui para uma melhor compreensão e utilização de cada uma delas.

Como resultado da análise das metodologias foi possível identificar alguns critérios usados com frequência nas diversas metodologias, tais como avaliação do uso de materiais com baixa emissão de poluentes, reuso de materiais, uso de materiais locais, materiais com adição de resíduos, avaliação dos impactos ambientais e bem-estar dos usuários; outro critério empregado com frequência é o uso de um fator de referência (*benchmark*) para determinar o desempenho ambiental ou avaliar critérios de sustentabilidade preestabelecidos. A Tabela 11 apresenta as metodologias analisadas para avaliação do desempenho do ambiente construído, organizado em ordem cronológica para um melhor entendimento e interpretação da evolução desta área.

Tabela 11 Metodologias para avaliação do desempenho ambiental de edifícios

Metodologia	Ano de criação	País	Resumo
BREEAM	1990	Reino Unido	A metodologia BREEAM avalia 9 indicadores de sustentabilidade através de performance de referência (<i>benchmark</i>); essa avaliação é realizada através de auditoria externa, atribuindo uma performance de não classificado, aprovado, bom, muito bom, excelente ou excepcional.
Building Environmental Performance Assessment Criteria (BEPAC)	1993	Canadá	O método BEPAC avalia o desempenho ambiental do edifício, dividindo o edifício em quatro módulos, onde cada módulo é avaliado por cinco categorias. Os parâmetros de avaliação definidos para cada categoria são divididos em Essenciais, Importantes ou Suplementares e podem receber uma pontuação de 1 a 10 pontos.
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)	1994	Estados Unidos	A metodologia LEED é basicamente uma verificação de um <i>checklist</i> técnico, e uma atribuição de créditos que orienta os projetistas a reduzir os impactos ambientais através de suas categorias com uso de um fator de referência (<i>benchmark</i>). Normalmente são seis: escolha do terreno, qualidade do ambiente interno, materiais, uso eficiente da água, uso eficiente da energia, inovação de projeto ou tecnologia.

Sustainable Building Tool – SBTool	1996	Canadá	A metodologia SBTool utiliza uma comparação entre edifícios, considerando um desempenho de referência (<i>benchmark</i>), em relação ao que é considerado desempenho típico ou mínimo. A comparação avalia o desempenho do edifício e relata o impacto ambiental, em termos absolutos, através dos indicadores de sustentabilidade avaliados. Os valores de desempenho são relacionados a uma escala que compreende -1, 0, +1, +3 e +5.
National Australian Building Environmental Rating System (NABERS)	1998	Austrália	A metodologia NABERS utiliza uma comparação entre edifícios, considerando um desempenho de referência (<i>benchmark</i>), desta forma é possível avaliar se os impactos ambientais estão sendo bem geridos. Esse procedimento comparativo leva, então, a uma avaliação qualitativa, e seu desempenho é atribuído em escala numérica de estrelas de 1 a 6.
Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency (CASBEE)	2002	Japão	A metodologia CASBEE baseia-se em critérios de comparação. É composta por várias ferramentas para diferentes estágios do ciclo de vida, considerando valores de referência (<i>benchmark</i>). Ela trabalha com um índice de eficiência ambiental do edifício padrão ou mínimo, e classifica cinco níveis de desempenho ambiental para edifícios: S (superior), A, B+, B e C, sendo S a melhor classificação.
German Sustainable Building Council (DGNB)	2007	Alemanha	A metodologia DGNB considera todo o ciclo de vida do edifício e produz uma avaliação balanceada em seis diferentes áreas: aspectos ambientais, aspectos econômicos e aspectos socioculturais/funcionais: tecnologia, processos e terreno. Dependendo do tipo específico de construção, a avaliação pode abranger até 40 critérios de sustentabilidade, certificando o ambiente construído em conceitos Ouro, Prata ou Bronze.
Alta Qualidade Ambiental (AQUA)	2007	Brasil	A metodologia AQUA, adaptação para o Brasil, compreende 4 grupos de avaliação: meio ambiente, energia, saúde e conforto, considerados valores de referência (<i>benchmark</i>). Cada grupo é avaliado em uma escala de 1 a 5 estrelas. A edificação é avaliada em cinco classificações possíveis, fornecendo uma pontuação global que vai de 4 a 16 estrelas.

Avaliação de Sustentabilidade (ASUS)	2008	Brasil	A metodologia ASUS é dividida em seis temas. Cada tema é subdividido em categorias, num total de dezoito, sendo algumas dessas divididas em subcategorias; há um total de setenta e nove critérios de avaliação. A avaliação do desempenho do edifício final é dada em 5 níveis de pontuação, de -1 a +5.
European Committee for Standardization EN 15804 (CEN, 2012)	2012	Europeia	A Norma Europeia EN 15804 (CEN, 2012) utiliza uma metodologia baseada na ACV, e se divide em módulos. Fornece diretrizes de cálculo para a avaliação do desempenho ambiental de edificações novas, existentes e projetos de reforma. Os potenciais impactos ambientais são atribuídos aos módulos em que ocorrem.
Instrumento para a Seleção de Materiais Mais Sustentáveis (ISMAS)	2014	Brasil	A metodologia ISMAS utiliza 7 categorias para avaliar o desempenho dos materiais, avaliando critérios e características preestabelecidos pela metodologia. Considera valores de referência (<i>benchmark</i>) para estabelecer o índice de sustentabilidade atingido pelo material, que pode ser definindo uma escala de cores e níveis em muito baixo, baixo, médio, alto e elevado.
Ferramenta SIDAC (Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção)	2022	Brasil	O SIDAC mensura indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da ACV. A primeira versão do SIDAC contempla os indicadores de demanda de energia primária e emissão de CO ₂ do berço ao portão para 40 insumos e 86 produtos de construção, divididos em 12 categorias de produto que perfazem cerca de 90% da massa de produtos de construção comercializados no Brasil, e possibilita estabelecer um benchmark para comparação de produtos. Futuramente, o SIDAC prevê outros indicadores de desempenho ambiental.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O conceito de sustentabilidade adotado por algumas metodologias demonstra uma subjetividade associada aos critérios a serem avaliados; esse ponto dificulta a possibilidade de padronizar critérios e termos a serem utilizados para avaliação do desempenho do ambiente construído.

Algumas das metodologias de avaliação de desempenho ambiental solicitam que as certificações concedidas as edificações necessitam ser renovadas, portanto, as certificações não são permanentes. Esse requisito demonstra que os conceitos de desempenho ambiental ou sustentabilidade adotado por essas metodologias são transitórios; o *benchmark* adotado atualmente por determinadas metodologias poderá não ser o mesmo de amanhã, devido aos avanços tecnológicos, mudanças de requisitos ou padrões de avaliação. O *benchmark* adapta-se às mudanças e necessidades dos usuários e das tecnologias que surgem.

O intervalo entre as renovações varia de acordo com as metodologias; essa renovação tem o objetivo de beneficiar-se de avanços tecnológicos e pesquisa, para refletir o momento atual e alterações nas prioridades de regulamentações e atuação do mercado, e para garantir que continue representando práticas de excelência no momento da avaliação.

Dentre as ferramentas e metodologias avaliadas, em sua maioria se destacam por avaliarem a edificação ou partes dela, apenas a metodologia ISMAS e a ferramenta SIDAC avaliam materiais da construção civil. Contudo, o SIDAC em sua primeira versão avalia apenas materiais da construção, mas sua estrutura apresenta indicações de que as próximas versões poderão avaliar o edifício como um todo.

2.3 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Os indicadores de sustentabilidade surgiram por meio dos objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS), que fornecem subsídios para o acompanhamento da sustentabilidade nas dimensões ambiental, social e econômica, e, oferecem um panorama abrangente de informações necessárias ao conhecimento da realidade que será estudada, de modo a preencher as lacunas existentes e a incorporar novas questões que estão sendo debatidas em âmbito nacional e internacional (IBGE, 2015); (ONU, 2016).

Os indicadores de sustentabilidade são entendidos como uma medida, de ordem quantitativa ou qualitativa, utilizada para organizar informações relevantes dos fenômenos que constituem o objeto da análise, um meio para se atingir o desenvolvimento sustentável (DALVI et al., 2013).

Os indicadores de sustentabilidade (IS) são categorias ou atividades desenvolvidas com objetivo específico, baseados em dados científicos, que fornecem um conjunto de informações e conhecimentos sobre certos fenômenos mensuráveis. Na indústria da construção civil, servem para analisar os impactos ambientais que determinada atividade da construção civil gera.

Os IS fornecem subsídios para o acompanhamento da sustentabilidade, instrumentos de mensuração, que são ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas através de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem (IBGE, 2015). Os indicadores de sustentabilidade reportam-se a fenômenos de curto, médio e longo prazo.

Tais indicadores ajudam a mensurar os impactos ambientais de empreendimentos da construção civil. Com base nessas métricas, os *stakeholders* podem desenvolver estratégias de desenvolvimento sustentável mais eficazes. Os indicadores de sustentabilidade começaram a surgir em meados da década de 1980, na Europa. Entretanto, foram oficialmente incluídos na pauta das nações a partir da Agenda 21 (GOMES, 2008).

Em 2002, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) lançou seus primeiros indicadores de sustentabilidade. A última atualização dos dados ocorreu em 2015, com a publicação Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IBGE, 2015).

Pode-se dizer que uma construção sustentável é aquela na qual são adotadas, em todas as fases do projeto e construção, medidas que visam a reduzir os impactos ambientais. Esse conceito também engloba o tempo de vida útil da obra, considerando a sustentabilidade de seu uso e manutenção.

Na construção civil, os indicadores de sustentabilidade de uma edificação estão baseados nos seguintes aspectos: emissões atmosféricas, uso da energia, uso do solo, uso de recursos hídricos, lançamento de efluentes, uso de matéria-prima e uso de materiais reciclados.

Segundo estudos de SANTOS et al., (2021) a crescente preocupação da sociedade perante à crise ambiental exige que o mercado da construção civil inclua por definitivo os

indicadores de sustentabilidade em seus projetos e construções de edifícios mais sustentáveis.

A necessidade de medir o desempenho ambiental, por meio de indicadores de sustentabilidade, é crescente em todas as atividades de trabalho, pois um indicador de desempenho é uma informação quantitativa e/ou qualitativa, que expressa o desempenho dos processos em termos de eficiência, eficácia ou nível de satisfação mínimos exigidos em relação ao meio ambiente (JAPPUR; FRANCISCON, 2018).

Um dos meios para avaliar a sustentabilidade na construção civil é pelo uso de indicadores de sustentabilidade adequados (ALMEIDA; COSTA; ALBERTE, 2020). Os indicadores funcionam como ferramentas que conduzem ao comportamento desejado e devem dar aos edifícios o direcionamento que precisam para atingir uma melhor performance ambiental.

A utilização de indicadores de sustentabilidade no ambiente construído demonstra ser indispensável para que haja um maior controle sobre os processos de execução, e para um sistema de gestão que atenda aos requisitos especificados nos projetos e no planejamento de obras. Além disso, a frequente verificação destes indicadores pelos *stakeholders* está vinculada a entrega de um produto adequado a exigências ambientais, permitindo a essas construções participar de auditorias para obtenção de certificações ambientais (SCANDELARI et al., 2016).

Os projetos e construções de edifícios sustentáveis utilizam indicadores de sustentabilidade específicos que orientam o sucesso do projeto almejado. Na identificação desses indicadores são analisados critérios que fornecem uma visão ou previsão do desempenho ambiental para as futuras edificações (STANITSAS; KIRYTOPOULOS; LEOPOULOS, 2021).

Fator importante na priorização de IS é identificar os principais aspectos do desempenho sustentável almejado. É quase inexecutável analisar todos os aspectos ambientais de um projeto. Desta forma se faz necessário estabelecer critérios e metas a serem avaliadas e mensuradas.

Conforme estudos de Li, Gu e Liu (2018) um número excessivo de indicadores tende a distorcer a visão geral que o conjunto supostamente deveria fornecer, apresentando uma

teia de informações interativas que leva a uma ineficiência no processo de avaliação devido às múltiplas variáveis.

As metodologias de avaliação do ambiente construído pressupõem que os IS sejam confiáveis, representativos, comparáveis e rastreáveis. Para ser mensurável, um IS deve, portanto, permitir uma análise das razões das mudanças em seu valor ao longo do ciclo de vida da edificação. Ser suficientemente simples na maneira com que descreve problemas frequentemente e complexos, usar definições comuns de componentes-chave e normalização para permitir comparações (STANITSAS; KIRYTOPOULOS; LEOPOULOS, 2021).

Os IS devem indicar e descrever os impactos ambientais no ambiente construído, para que os proprietários, usuários dos edifícios e *stakeholders* da indústria de construção possam manifestar-se e opinar de forma consciente. Tais métricas são necessárias para simplificar e comunicar informações complexas, e devem ser utilizadas para tomada de decisão.

O objetivo de um indicador de sustentabilidade é apontar a existência de riscos, potencialidades e tendências no desenvolvimento de uma atividade específica para que, em conjunto com especialistas da área, decisões possam ser tomadas de forma mais racional. São um conjunto de sinais que facilitam a avaliação de certos fenômenos na busca pelo desenvolvimento sustentável, sendo ferramentas cruciais no processo de identificação de impactos ambientais.

Os IS tratam de fenômenos ambientais mensuráveis de forma quantitativa e qualitativa, que estão relacionados aos objetivos de preservação e conservação do meio ambiente, considerados fundamentais para a qualidade de vida das gerações atuais e em benefício das gerações futuras.

2.3.1 A sustentabilidade e seu viés econômico

Sustentabilidade é definida pela sistemática da utilização adequada dos recursos ambientais e socioeconômicos para permitir que as gerações futuras também desfrutem desses recursos antes de esgotá-los a curto prazo pela geração atual. O conceito foi imortalizado pela Comissão Brundtland, em 1987. Dessa forma, os indicadores de sustentabilidade têm a função de retratar a situação atual, aferindo em diversas escalas o

desempenho ambiental, avaliando as atividades do passado e do presente para atingir metas futuras.

O aumento da competitividade e a busca pelo crescimento econômico sustentável têm se tornado as principais engrenagens para tal mudança; nos últimos anos, há uma crescente onda de investigação que busca o melhor entendimento dos pilares da sustentabilidade em cadeia de produção, baseada em medidas de performance produtiva.

A sustentabilidade ambiental tem um viés ligado ao desempenho econômico-financeiro das empresas. Como contrapartida, as iniciativas que têm sido desenvolvidas com objetivo de mensurar os impactos ambientais tem de entrada uma motivação financeira para suas empresas. Cada vez mais as empresas se preocupam com o meio ambiente, mas como parte de uma estratégia comercial e de marketing.

Na construção civil, o custo ambiental pode ser mensurado através de seus resíduos, emissão poluentes e consumo de energia, seja energia elétrica ou combustíveis fósseis. Para cada unidade de resíduos e emissões poluentes de saída, teremos um custo para a correta destinação ou tratamento quando necessário. O conceito de sustentabilidade está ligado diretamente à responsabilidade social, e, tornou-se uma vantagem competitiva.

O uso dos recursos naturais, por sua vez, tem como objetivo uma atividade de produção, e tem-se a transformação das matérias primas em produto acabado. Esse processo produtivo gera resíduos e emissões poluentes, e, a triagem e seleção destes resíduos para possível reciclagem, e uma posterior venda e geração de receita, reduz seus impactos e contribui para o desempenho ambiental.

2.4 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

A ACV é uma metodologia desenvolvida para mensurar os possíveis impactos ambientais causados como resultado da extração, fabricação, utilização, descarte ou reciclagem e transporte em todas as fases de determinado produto ou serviço (GONZALEZ et al., 2020).

O ciclo de vida se refere a todas as etapas de produção e uso do produto, relativas à extração das matérias-primas, beneficiamento, produção, distribuição/transporte, consumo e disposição final. Contemplam-se também a reciclagem e reuso, quando for o caso (COLANGELO et al., 2020).

Muito se fala sobre mudanças climáticas e impactos ambientais (RESCH et al., 2021); as emissões de CO₂ são um dos principais agentes causadores do aquecimento global e mudanças climáticas, porém esses não são os únicos tipos de impactos ambientais possíveis no processo produtivo. A produção de qualquer produto pode atingir o meio ambiente de diferentes formas (RAMÍREZ; ERIKSSON; OLOFSSON, 2019).

Algumas das categorias de impacto que podem ser consideradas em um estudo de ACV são: aumento do teor de acidez do solo, água e ar (acidificação) (CALDAS et al., 2021a); (DI MARIA et al., 2020); (QUINA et al., 2020); aumento dos agentes tóxicos que podem causar danos à biosfera (ecotoxicidade) ou podem causar danos à saúde humana (toxicidade humana) (CALDAS et al., 2020a); esgotamento de recursos naturais não renováveis; aumento do buraco na camada de ozônio, entre outros.

2.4.1 ACV na Construção Civil

A metodologia de avaliação de ciclo de vida tem sido usada no setor da construção civil desde a década de 90 (PILZ; MACENO, 2020), e se tornou uma técnica de grande magnitude para avaliação de possíveis impactos, além de promover construções sustentáveis (ARRIGONI et al., 2017); (THIEL et al., 2013).

Na construção civil, as etapas do ciclo de vida de uma edificação são a produção, construção, manutenção, demolição e a destinação final; podem ser consideradas também as etapas de reciclagem e reuso, que são definidas como potenciais benefícios. A etapa de produção inclui a extração da matéria prima, o transporte e o beneficiamento (ATTIÉ; SALGADO, 2021).

Com o advento da norma ABNT NBR (15575-1, 2013), veio a recomendação aos projetistas que avaliem, junto aos fabricantes, os resultados de inventários de ciclo de vida de seus produtos, como forma de auxiliar a tomada de decisão na avaliação do impacto que esses elementos podem provocar ao meio ambiente. Desta forma, a metodologia mais utilizada para alcançar esses resultados é a ACV, utilizada para quantificar os possíveis impactos ambientais provocados pela extração, beneficiamento, uso, transporte, demolição, destinação final e muitas vezes a reciclagem de materiais construtivos e ou sistemas da construção (CALDAS; LIRA; SPOSTO, 2017).

2.4.2 Metodologia da ACV

As normas ABNT NBR ISO 14000 são um conjunto de normas internacionais relacionadas à gestão ambiental, das quais a ABNT NBR ISO 14001:2015 é a norma mais conhecida, porque é nela que são estabelecidos os requisitos para implantação de sistemas de gestão ambiental e sua certificação. As normas ISO 14000 constituem a família de normas para elaboração e condução da avaliação de ciclo de vida. Na Tabela 12 são apresentadas as normas atualmente relacionadas com a avaliação de ciclo de vida.

Tabela 12 Normas ABNT NBR ISO 14000 relacionadas com a ACV

Norma	Título
ABNT NBR ISO 14040:2014	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura
ABNT NBR ISO 14044:2014	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações
ABNT NBR ISO 14045:2012	Gestão ambiental - Avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto - Princípios, requisitos e orientações
ABNT NBR ISO 14046:2014	Gestão ambiental - Pegada hídrica - Princípios, requisitos e diretrizes
ABNT NBR ISO 14047:2012	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impactos
ISO 14048:2002	Environmental Management – <i>Life Cycle Assessment – Data documentation format</i>
ABNT NBR ISO 14072:2014	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário
ABNT NBR ISO 14071:2014	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009
ANBT NBT ISO 14072:2014	Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional

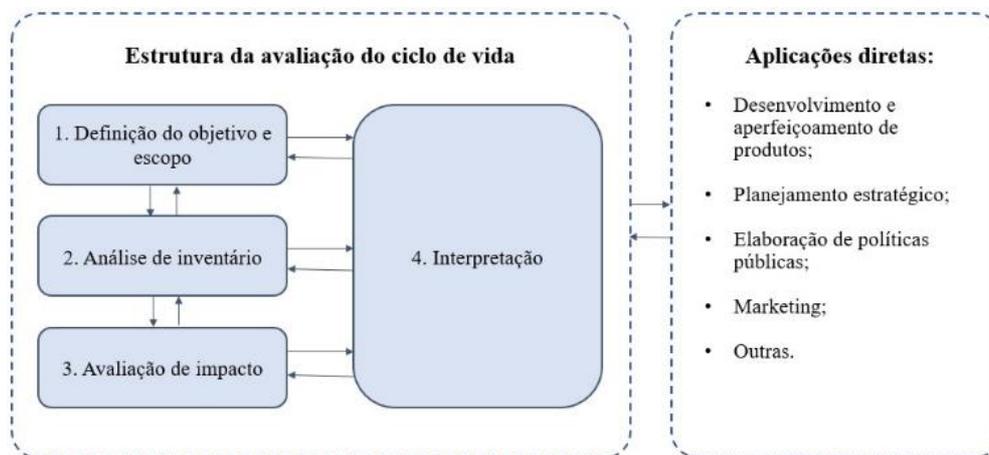
Fonte: Elaborado pelo autor

Outra norma de interesse é a ABNT NBR ISO 9000:2015, que descreve os conceitos fundamentais e princípios de gestão da qualidade que são universalmente aplicáveis a todos os processos que buscam melhorias, sustentados pela implementação de um sistema de gestão da qualidade.

O procedimento da avaliação de ciclo de vida ACV segue quatro etapas prescritas pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2014 e ABNT NBR ISO 14044:2014. As etapas padrão de um estudo de ACV incluem definição de objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida

(ICV), avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação, como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 Estrutura da avaliação do ciclo de vida ACV



Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2014

O estudo da ACV estabelece em que contexto a avaliação será realizada, definindo sua abrangência e profundidade. O estudo da ACV serve como subsídio na identificação de melhorias em relação ao processo de produção e desempenho ambiental do produto. Além disso, disponibiliza uma série de indicadores ambientais para uma possível qualificação ambiental.

2.4.3 Definição do objetivo e escopo da ACV

A definição do objetivo e escopo é uma etapa importante na identificação do nível de detalhamento dos trabalhos, e da forma de divulgação dos dados para se adequar ao público-alvo. O objetivo e o escopo devem ser definidos de forma clara e consistente de acordo com a aplicação pretendida na ABNT NBR ISO 14044:2014.

2.4.3.1 Objetivo da ACV

A definição do objetivo da ACV inclui os seguintes itens: aplicação pretendida, razões do estudo, bem como a quem se pretende comunicar os resultados e se há intenção de publicar os dados comparativamente entre produtos. Isso auxilia a identificar as necessidades de revisão crítica, incluindo a forma e nível técnico adequados dos relatórios.

2.4.3.2 Escopo da ACV

A norma ABNT NBR ISO 14040:2014 estabelece que a definição do escopo da ACV deve ser padronizada pelos seguintes itens: sistema de produto; funções do sistema; unidade funcional; fronteira do sistema; procedimentos de substituição; categorias de impacto e metodologia de avaliação dos impactos; requisitos de dados; pressupostos; limitações; análise crítica do estudo e o tipo e formato do relatório para o estudo.

Os itens constituintes do escopo são detalhados na ABNT NBR ISO 14044:2014 e descritos a seguir:

- a) Sistema de produto: definição da função do produto e a sua aplicação;
- b) Unidade funcional: quantifica o desempenho do produto e serve de referência para relacionar as entradas e saídas, com a finalidade de assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV. A escolha da unidade funcional deve ser criteriosa, tendo em vista que é importante para a comparação dos resultados da ACV de produtos alternativos.
- c) Fronteira do sistema: delimitação dos processos que serão analisados no estudo. A seleção dos limites está associada ao objetivo do estudo. As fronteiras utilizadas usualmente são:
 - Do berço ao túmulo (*Cradle to grave*): compreende a extração dos recursos, transporte, produção até o descarte do produto;
 - Do berço ao portão (*Cradle to gate*): abrange a extração dos recursos, transporte, fabricação e se encerra com o produto pronto para sair do portão da fábrica;
 - Do portão ao portão (*Gate to gate*): inclui apenas a produção do produto;
 - Do portão ao túmulo (*Gate to grave*): compreende a produção até o descarte;
 - Do berço ao berço (*Cradle to cradle*): inclui da extração dos recursos até a reciclagem do produto.

- d) Procedimentos de substituição: procedimento adotado quando há problemas de multifuncionalidade, quando se consideram processos industriais nos quais muitos produtos e subprodutos são gerados a partir das mesmas matérias-primas.
- e) Categorias de impacto e metodologia de avaliação de impactos: representam as questões ambientais relevantes associadas ao sistema analisado. O inventário do ciclo de vida (ICV) também requer a definição da modelagem aplicada ao sistema, que pode ser do tipo atribucional ou consequencial, descritos a seguir:
- Modelagem atribucional: representa os impactos ambientais potenciais de um produto ao longo do seu ciclo de vida; é designada como “descritiva” e utiliza dados mensuráveis e históricos.
 - Modelagem consequencial: identifica as consequências de uma decisão nos processos e produtos; é baseada em mecanismos de mercado, incluindo interações políticas e alterações do comportamento dos consumidores, por exemplo.
- f) Requisitos de dados: as fontes de dados e informações podem ser classificadas em fontes primárias e secundárias:
- Dados primários: são aqueles que ainda não foram coletados e possuem o propósito de atender às necessidades específicas da pesquisa;
 - Dados secundários: são aqueles que já foram coletados e estão catalogados à disposição do pesquisador.

As fontes de dados primários podem ser questionários, entrevistas, observação e experimentação. As fontes de dados secundários podem ser bancos de dados nacionais, publicações científicas, relatórios nacionais e internacionais. As combinações entre dados primários e secundários são possíveis, se eles forem consistentes.

- g) Análise crítica: consiste na verificação da consistência da análise realizada e nível de satisfação de requisitos, como metodologia, dados, interpretação e comunicação.

- h) Tipo e formato de relatório: é a forma de divulgação dos resultados e conclusões da ACV ao público-alvo.

O escopo deve ser bem definido para garantir que o objetivo da ACV seja atendido. Algumas situações podem exigir que o escopo seja revisado e ajustado, em caso de limitações ou restrições ao desenvolvimento do trabalho.

2.4.3.3 Unidade funcional da ACV

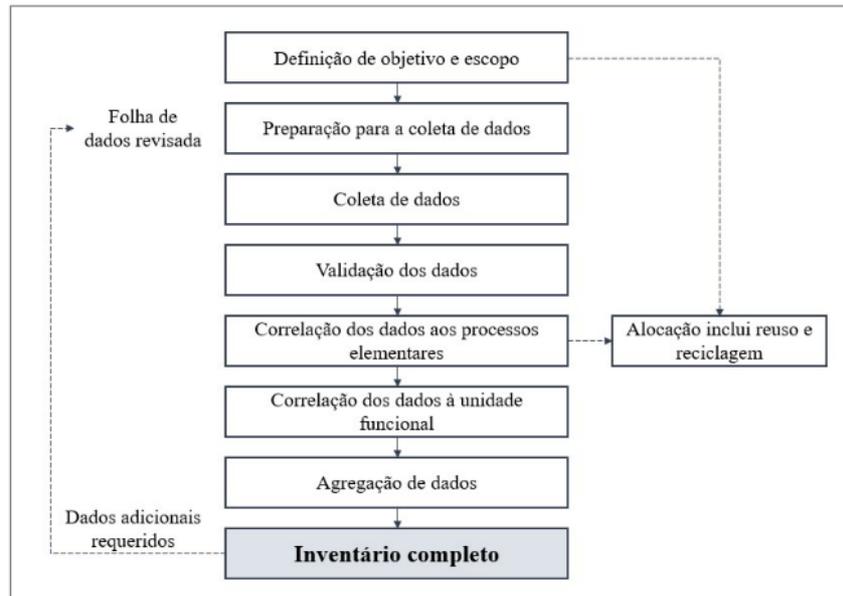
A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas, características de desempenho e produto. O propósito primário de uma unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. Essa referência é necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados de ACV. A comparabilidade dos resultados de ACV é particularmente crítica quando diferentes sistemas estão sendo avaliados, para assegurar que as comparações entre eles sejam feitas em uma base comum, segundo ABNT NBR ISO 14040:2014.

A ACV é estruturada em torno de uma unidade funcional. Essa unidade funcional define o que está sendo estudado. Todas as análises subsequentes são então relativas àquela unidade funcional, uma vez que todas as entradas e saídas no ICV e, conseqüentemente, o perfil da AICV, estão relacionados à unidade funcional (ABNT NBR ISO 14040:2014).

2.4.4 Inventário do ciclo de vida (ICV)

A segunda fase da ACV envolve a coleta de dados necessários ao alcance dos objetivos do estudo, ou seja, nesta fase ocorre a criação de um inventário de dados de entrada e saída do sistema de produto, considerando as fronteiras e a unidade funcional pré-estabelecida. O ICV é um processo de quantificação das necessidades de energia, matérias-primas, emissões atmosféricas, resíduos sólidos, dentre outras liberações ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou atividade. As recomendações da ABNT NBR ISO 14044:2014 indicam que a execução do inventário deve ser realizada por meio de procedimentos destacados na Figura 21.

Figura 21 Procedimentos simplificados para execução do inventário do ciclo de vida



Fonte: ABNT NBR ISO 14044:2014

2.4.4.1 Coleta de dados

A coleta de dados deve ser realizada para cada processo elementar previsto na fronteira do sistema, a fim de quantificar as respectivas entradas e saídas. Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), o processo elementar é o “menor elemento considerado na análise do inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados”. Nesta fase, devem ser registrados o processo de coleta, a época e todas as informações adicionais importantes para as conclusões do estudo. Também é fundamental a elaboração de fluxogramas para os processos elementares e a descrição dos procedimentos de cálculo considerados. Conforme a ABNT NBR ISO 14044:2014, os dados podem ser classificados em:

- Entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas;
- Produtos, coprodutos e resíduos;
- Liberações para a atmosfera, água e solo;
- Outros aspectos ambientais.

A correlação dos dados deve ser realizada com base nos fluxos de cada processo elementar, que juntos formarão o fluxo de referência. Para isso, todos os dados de entrada e saída devem ser referenciados à unidade funcional.

2.4.4.2 Procedimentos de cálculo

A norma ABNT NBR ISO 14044:2014 propõe as seguintes recomendações para os procedimentos de cálculo do inventário do ciclo de vida:

- Aplicar os mesmos procedimentos de cálculo ao longo de todo o estudo;
- Os fluxos elementares devem ser associados à linha de produção;
- A agregação de dados deve ser realizada somente para substâncias equivalentes e impactos ambientais semelhantes;
- A fronteira do sistema poderá ser revisada para limitar o uso de dados de entrada e saída;
- O processo de refinamento pode resultar em exclusão de estágios do ciclo de vida ou de processos elementares não significativos, exclusão de entradas e saídas ou inclusão de novos processos importantes para os resultados do estudo.

2.4.5 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) permite analisar a intensidade dos aspectos ambientais apresentados durante a etapa de inventário e agregar as intervenções em vários ou um único indicador. Os fluxos elementares do sistema são relacionados aos impactos direcionados gerados ao meio ambiente, em nível global, regional ou mesmo local (FIGUEIREDO, 2017).

A avaliação de impactos é a fase da avaliação do ciclo de vida que visa entender e analisar a magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT NBR ISO 14044:2014).

Atualmente existem inúmeros métodos de AICV em bancos de dados, porém existe uma limitação para cada metodologia devido à especificidade de cada estudo, compreendendo fatores como local de origem e nível de avaliação.

Foram desenvolvidas pesquisas por Mendes et al., (2016) e Pilz, Maceno, (2020) sobre os métodos de AICV mais utilizados. Utilizou-se o procedimento metodológico de revisão bibliográfica e realizou-se um levantamento na base de dados *Web of Knowledge* sobre os seguintes termos de pesquisa: *Life Cycle Impact Assessment (LCIA) e methods; LCIA e methodologies*, nos repositórios *Science Direct, Springer Link e The International Journal of Life Cycle Assessment*. A partir da análise das publicações sobre AICV, foram identificados os métodos mais utilizados e citados em artigos disponíveis em bancos de dados internacionais. A Tabela 13 demonstra os métodos de impacto mais utilizados nesses estudos.

Tabela 13 Métodos de AICV analisados.

Métodos de AICV
CML
Eco-indicator 99
Ecological Scarcity
EDIP
EPS 2000 Impact
Impact 2002+
LIME
LUCAS
MEEuP
ReCiPe
TRACI
USEtox
IMPACT World+
Ecoinvent v3.011
CED v1.08
ILCD 2011
CED
CML 2001
GWP
Ecological
Scarcity 2006
ReCiPe endpoint
IMPACT 2002+
ReCipe midpoint
EPS2000
Swiss Ecoscarcity
TRAC

Fonte: Elaborado pelo autor

A maior parte dos métodos utilizados nos estudos analisados são classificados como métodos de *midpoint*, com exceção dos métodos Eco-indicator 99 (*endpoint*), IMPACT 2002+ (*endpoint*) e ReCiPe (*midpoint* e *endpoint*) (MENDES et al., 2016; PILZ; MACENO, 2020).

2.4.5.1 Métodos de impacto aplicados à modelagem ambiental

Os métodos de AICV possuem diversas características que os diferem entre si, em decorrência da abrangência de atuação dos pesquisadores, que variam desde questões mais técnicas até aspectos mais conceituais, como a definição da categoria de impacto, unidade de referência UF, escala espacial ou temporal e referências ou coleta de dados. Como consequência, o pesquisador da avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) se depara constantemente com o dilema de selecionar o método que tenha o portfólio mais apropriado para o seu estudo.

Desta forma, apesar de existirem esforços internacionais na recomendação de indicadores de categoria, é relevante avaliar e recomendar modelos de caracterização mais apropriados ao contexto brasileiro que considerem os biomas, solos, climas e divisões geográficas que reflitam as vulnerabilidades das regiões brasileiras (UGAYA; NETO; FIGUEIREDO, 2019, página 7).

Conforme estudos realizados por Medeiros et., al (2018), os métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) se dividem em três níveis, sendo: *midpoint* ou *endpoint* isoladamente, ou uma abordagem combinada entre *midpoint* e *endpoint*.

O método *midpoint*, ou ponto médio, é orientado para o problema, e utiliza indicadores localizados ao longo do estudo ambiental antes do ponto final da categoria; já o método *endpoint*, ou de extremidade, é orientado para o dano final, e considera todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final. Também pode ser utilizada uma análise combinada, considerando as vantagens das abordagens *midpoint* e *endpoint* em conjunto.

A metodologia *midpoint* determina um número maior de categorias de impacto, apresentando resultados mais exatos e precisos em comparação com avaliações *endpoint*, que normalmente consideram apenas três áreas de impacto ambientais (BUENO et al., 2016). A metodologia de impacto *midpoint* vem sendo tradicionalmente utilizada em pesquisas por apresentar uma variedade de categorias de impactos ambientais (BUENO et al., 2016), (HUIJBREGTS et al., 2016).

Os métodos de *midpoint* (ponto médio) oferecem maior transparência, pois modelam os impactos orientados aos problemas em cada estágio inicial da cadeia de causa e efeito (PILZ; MACENO, 2020).

No Brasil, as metodologias *midpoint* mais utilizadas e referenciadas na literatura nacional são os métodos CML 2002 e o Eco-indicator 99, devido a dois aspectos principais: abrangência global das categorias consideradas em conformidade com as características do meio ambiente brasileiro, e a atribuição de pesos e notas no cálculo baseada em índices mundiais. Para tanto, o método ReCiPe 2016 consiste na continuação dos métodos CML 2002 e Eco-indicator 99, sendo o mais recomendado atualmente (MEDEIROS et., al 2018).

2.4.5.2 Categorias de impactos ambientais

Qualquer modificação do meio ambiente resultante da atividade humana, seja ela adversa ou benéfica, é classificada como categoria de impactos ambientais, e se refere a um dano específico relacionado com a área mais ampla de proteção, que pode ser classificado em categorias de danos que variam de acordo com o método escolhido.

O método de impacto ReCiPe 2016 é uma versão atualizada e estendida do ReCiPe 2008. Essa versão inclui categorias de impactos de ponto médio (orientado para o problema) e ponto final (orientado para danos), disponíveis para três perspectivas diferentes: individualista (I), hierarquista (H), e igualitária (E). Os fatores de caracterização são representativos para a escala global (HUIJBREGTS et al., 2017).

O método ReCiPe 2016 compreende dois conjuntos de categorias de impacto, *midpoint* e *endpoint*. O conjunto associado a fatores de caracterização no nível *midpoint* conta com 18 categorias de impacto, tais como: aquecimento global, depleção estratosférica de ozônio, radiação ionizante, formação de ozônio, saúde humana, formação de partículas finas, ecossistemas terrestres, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, toxicidade cancerígena humana, toxicidade não carcinogênica humana, uso da terra, escassez de recursos minerais, escassez de recursos fósseis e consumo de água (AZEVEDO; GERALDI; GHISI, 2020), (HUIJBREGTS et al., 2016).

No nível de *endpoint*, os impactos são multiplicados por fatores de dano e agregados em três categorias: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais (OCHARÁN; LIMA; LOVÓN, 2019).

Avaliar os impactos ambientais das mais diversas exterioridades, gerados por uma determinada atividade, consiste em uma das etapas mais importantes na avaliação do ciclo de vida (ACV), uma vez que existem vários métodos e categorias de impacto, e esses devem ser selecionados de acordo com o objetivo do estudo.

2.4.6 Interpretação da ACV

A ACV permite criar métricas confiáveis para avaliar a sustentabilidade do produto e processos para a redução da sua pegada ambiental. A variável ambiental se expressa na forma de indicadores de desempenho associados aos produtos e serviços desenvolvidos pelo estudo realizado, geralmente em conjunto com outras metodologias tais como: Custo do Ciclo de Vida (CCV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) e desempenho.

Com um maior conhecimento sobre as etapas do ciclo de vida de seus produtos, os interessados podem identificar onde ocorrem ineficiências, e avaliar as possibilidades de otimização do uso de materiais e energia, condições associadas à redução de custos e geração de impactos ambientais da produção, uso e descarte do produto.

2.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÕES DE CO₂ NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões CO₂ (ACVCO₂) é uma ferramenta que permite avaliar as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço. Na construção civil, a ACVCO₂ pode ser aplicada para avaliar a sustentabilidade ambiental de um edifício desde a extração de materiais até o fim de sua vida útil.

As emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) provocadas pelas atividades humanas tornaram esse tema mundialmente relevante, e percebe-se sua importância nos diversos impactos ambientais e sua consequência nas mudanças climáticas.

A ACVCO₂ pode ser utilizada desde a fase de projeto para a seleção de materiais e tecnologias que tenham menor impacto ambiental, até a fase de operação do edifício, para

avaliar o desempenho ambiental. Dessa forma, a ACVCO₂ permite a avaliação de todo o ciclo de vida do edifício e a identificação de oportunidades de melhoria em cada fase.

No setor da construção civil, especificamente no setor de materiais, essas emissões podem ser mais bem compreendidas e estudadas através da metodologia de avaliação do ciclo de vida de emissões (ACVCO₂), que quantifica o consumo energético de um material, produto ou processo, incluindo a energia elétrica e combustíveis fósseis utilizados para a sua produção, entradas (consumo de matéria-prima, energia) e saídas (emissões, CO₂, CH₄, N₂O e outros gases poluentes), o que originou o termo “pegada de carbono”.

A pegada de carbono é uma metodologia amplamente utilizada para calcular a emissão de gases do efeito estufa (ABDALLAH; ELFEKY, 2021); (PESTA; SERESOVÁ; KOSI, 2020); (HE et al., 2019). Esta metodologia quantifica as emissões poluentes em dióxido de carbono CO₂ equivalente (CO₂-eq), quilogramas de dióxido de carbono CO₂ (kgCO₂) ou toneladas de dióxido de carbono CO₂ (tCO₂).

A pegada de carbono é uma metodologia que vem sendo utilizada para mensuração de impactos relacionados às mudanças climáticas, e quando utilizada para atividades logísticas, pode contribuir para a Logística Verde e pegada ambiental (SANTANA; TOSHIE OIKO, 2019). Nesse contexto, torna-se necessária a utilização de indicadores de desempenho que mensurem quais atividades estão sendo prejudiciais ao meio ambiente, e a gravidade de seus respectivos impactantes.

Existem diversos tipos de gases do efeito estufa (GEE), sendo que os mais importantes em termos de contribuição para o aquecimento global e mudanças climáticas são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Na metodologia da pegada de carbono, todos esses gases nocivos ao planeta são convertidos em carbono equivalente (ROSADO; PENTEADO, 2019).

O Acordo de Paris é um tratado mundial que objetivava conter o aquecimento global. Mais de 190 países assinaram o acordo durante a COP21 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015), em Paris, na França. Nesse tratado, os governos se comprometeram a tomar medidas de incentivo à redução da pegada de carbono, cada país abrangendo seu contexto de crescimento populacional, econômico e ambiental. As medidas e metas do tratado passaram a ter validade em 2020.

Apesar dos esforços do COP21, o mundo continua no caminho para um perigoso aumento da temperatura global. Medidas mais enérgicas foram planejadas e implantadas na COP26. A Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021 foi a 26.^a conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26), realizada em na cidade de Glasgow, na Escócia. A conferência incluiu também a 16.^a reunião das partes do Protocolo de Quioto (CMP16) e a 2.^a reunião das partes do Acordo de Paris.

A conferência foi realizada com a participação de delegações de quase 200 países, acompanhada por grandes manifestações de grupos ambientalistas. Acordos setoriais específicos sobre florestas, carvão, automóveis e metano, além de um acordo para sustar o financiamento de combustíveis fósseis no exterior, exigirão ratificação dos legislativos dos países antes de entrarem em vigor. Segundo cálculos do *Climate Action Tracker*, esses acordos fecharão apenas 9% da lacuna de emissões.

O COP26 reestruturou os padrões para redução do aquecimento global acima dos níveis pré-industriais de 2°C para 1,5°C (grau Celsius). Os esforços para limitar o aquecimento global apresentam planos ousados, com prazos e metas antecipadas para eliminar o carvão e transformar vários segmentos da indústria com objetivo de zerar as emissões. Entretanto, muitos dos compromissos estabelecidos só serão atingidos após 2030.

A 27.^a Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas, COP27, e ocorreu em 6 de novembro a 18 de novembro de 2022 em Sharm El Sheikh, Egito e teve seu auge sob as expectativas geradas pelos resultados do relatório divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), divulgado em fevereiro do mesmo ano. O documento destaca, agora com mais dados científicos em relação ao relatório anterior, os efeitos das mudanças climáticas no planeta.

Os dados científicos demonstram que é preciso reforçar o cenário de expectativa. De acordo com os dados, a ciência é clara: devemos estudar e desenvolver mais ações do clima ainda nesta década, para almejarmos alcançar a neutralidade de carbono até 2050 e, em última análise, a meta de 1,5 grau, proposta na COP26. Precisamos também acelerar as ações para promover a neutralidade de carbono.

A meta brasileira corresponde a uma redução de 66% na emissão de gases do efeito estufa, por unidade do PIB, até 2025 e de 75% até 2030, ambas em relação a 2005 (MARIN;

MASCARENHAS, 2020). Atualmente o Brasil ocupa o 15º lugar na classificação mundial de quantidade de emissões de CO₂ por consumo de energia. Muitas indústrias vêm atuando na redução da pegada de carbono; contudo, ainda contam com baixos resultados, atingindo somente 10% nas reduções.

À medida em que a questão das mudanças climáticas ganha cada vez mais importância na agenda ambiental dos países e cidades (CALDAS et al., 2021b), a pegada de carbono de produtos e materiais de construção tende a se tornar cada vez mais requisitada para projetos e seus produtos (SATOLA et al., 2020); (ALBUQUERQUE; LIRA; SPOSTO, 2018).

Sob essa ótica, os projetistas, construtores e outros atores do setor da construção fomentam a busca por produtos de menor ou baixo teor de carbono para integrar seus empreendimentos, atendendo a determinados critérios ambientais, almejando a concessão de um selo verde ou uma rotulagem ambiental (GOMES; CASAGRANDE, 2018); (HOE; PIRES, 2017).

A avaliação da pegada de carbono de um material empregado na construção civil é uma etapa muito importante de uma ACV, na qual são quantificadas as emissões poluentes, e identificados os insumos e etapas do ciclo de vida que mais emitem GEE no ciclo de vida do produto. Por exemplo, pode ser verificado que em uma edificação residencial a estrutura em aço (SAADE et al., 2011), estrutura de concreto armado (XIA; DING; XIAO, 2020) e alvenaria de blocos cerâmicos (PESSOA et al., 2020) são os elementos que mais contribuem para as emissões de GEE.

Deve-se considerar os efeitos da pegada de carbono na construção civil em dois momentos: durante o período de construção e ao longo dos anos de uso. Dessa forma, não adianta projetar uma edificação eficiente se não forem considerados materiais e técnicas em sua construção. A etapa de construção é geralmente quando se tem o maior impacto ambiental (CALDAS et al., 2017), devido a movimentação de terra, uso de energia elétrica, uso de combustíveis fósseis e aquisição de materiais. Portanto, um bom projeto e gerenciamento são fundamentais para otimizar o processo de construção.

Um dos pontos mais importantes é o momento de especificar os materiais da construção: cimento, estrutura, tijolos, blocos, cobertura, revestimento, iluminação, portas, janelas e

outros, que passam por um processo de fabricação, que pode causar mais ou menos impactos ambientais em relação a outros materiais de mesma categoria.

Nesse contexto, é importante entender o impacto desse processo de fabricação no ciclo de vida do material: como esse material é fabricado, de onde vem a matéria-prima, como é feita a extração, se é feita a reciclagem desse material e qual é seu destino. Dessa forma, devemos priorizar materiais produzidos na região, evitando uma considerável quantidade de emissão de poluentes no transporte até a obra.

Além da escolha dos materiais, existem outras técnicas que abrangem a redução da pegada de carbono em uma construção. Essas técnicas colaboram para reduzir os impactos do edifício durante seu uso, como: uso de energia renovável, elementos passivos para conforto térmico – como brisas e ventilação natural –, captação de água da chuva, tratamento de água (quando possível) e outros.

González e Navarro (2006) apontam para uma redução de quase 30% em termos de emissões de CO₂ devida a uma correta escolha dos materiais de construção, evitando a emissão de 38 toneladas de CO₂. Apontam, inclusive, que um edifício construído com materiais de baixo impacto ambiental apresentará uma redução de emissões em CO₂ de aproximadamente 72 kgCO₂/m² na sua construção.

Dimoudi e Tompa (2008) relatam que para uma vida útil de um edifício de 50 anos, as emissões de CO₂ por área útil de construção podem ser estabelecidas em valores aproximados de 298 kgCO₂/m².

2.5.1 Mecanismos para a compensação do dióxido de carbono (CO₂)

Nos anos 1990, o mecanismo chamado de sequestro de carbono foi lançado na Convenção do Clima da ONU como um instrumento de flexibilização dos compromissos de redução das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) dos países com metas de redução. Trata-se de uma das modalidades dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto para compensar as emissões poluentes e mitigar a mudança climática (YU, 2004).

O sequestro de carbono refere-se ao processo biológico das plantas de absorver o CO₂ do ar e fixá-lo em forma de matéria lenhosa, nas folhas, galhos, troncos e raízes. Atualmente, outros termos estão sendo adotados na literatura, porém com a mesma finalidade, como:

crédito de carbono, neutralização de CO₂, sequestro florestal de carbono, compensação de emissões e compensação de carbono.

A compensação de gases de efeito estufa é um processo que se define pela retirada de dióxido de carbono CO₂ da atmosfera, por meio de árvores de reflorestamento; é um conceito de compensação, e não de neutralização. A compensação de carbono pode ser considerada uma forma de mitigação dos impactos ambientais em que as indústrias, empresas, instituições e cidadãos têm a possibilidade de compensar suas emissões de CO₂, minimizando os possíveis impactos ambientais (FLIZIKOWSKI, 2012).

A compensação de carbono por plantio de árvores ocorre pelo sequestro de carbono da atmosfera, que é fixado na biomassa da planta, ou seja, sequestrado do meio ambiente para ser fixado na planta.

Uma árvore, em média, é capaz de sequestrar 15,6 quilos de CO₂ por ano (HEMDADES, 2009). Isso facilita a determinação de quantas árvores serão necessárias para compensar as emissões provocadas pela atividade da vida em sociedade.

Segundo Lacerda (2009), uma árvore sequestra em média 249,6 kgCO₂ em 20 anos e, nas piores hipóteses, pode fixar até 140 kg. Já segundo estudos realizados pelo Instituto Totum e pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ, 2013) da Universidade de São Paulo, em parceria com a Fundação SOS Mata Atlântica, uma árvore na Mata Atlântica pode absorver em média 163,14 kg de CO₂ nos primeiros 20 anos, ou 8,15 kg por ano, deixando evidente que após os vinte anos a mesma árvore pode fixar mais ou menos carbono.

Há outros estudos, como o do Programa de Carbono Compensado LEPAC, que apresentou resultados em que uma árvore plantada leva à compensação de 200 kg CO₂ em 20 anos (RODACOSKI; ANDRADE, 2014).

Junior et al. (2021) estimam que cada árvore da Mata Atlântica absorve em média 82 kg de CO₂ ao longo de seus primeiros 20 anos e que são necessárias 12,2 árvores nativas de Mata Atlântica para compensar cada tonelada de CO₂-eq emitida.

Como visto, estudos apresentam uma variação nas quantidades de dióxido carbono que uma árvore pode retirar da atmosfera; essa variação nos resultados pode ser atribuída às diferentes espécies arbóreas e regiões climáticas utilizadas nos estudos. Observa-se

também nos estudos que as árvores de reflorestamento, como pinus e eucalipto, apresentam um crescimento mais rápido e conseqüentemente uma maior captura de CO₂ da atmosfera.

2.5.2 Sequestro de carbono na construção civil

O importante papel que o setor da construção civil tem na economia e os relevantes impactos ambientais que essa área produz evidenciam a importância do desenvolvimento de mecanismos de mitigação dos GEEs aplicados às empresas do ramo, com a implementação de estratégias de redução de emissões e modelos de compensações das emissões poluentes. Atualmente o modelo adotado é realizado por meio de plantios florestais com o objetivo da compensação de emissões (GALLO JUNIOR et al., 2018), (FLIZIKOWSKI, 2012).

A compensação do dióxido de carbono CO₂ se refere ao processo de mitigação biológica das plantas, que absorvem o CO₂ da atmosfera e o transformam em biomassa. O plantio de florestas possui relação direta com as mudanças climáticas, sendo utilizado como principal método de compensação de emissões de GEEs.

Segundo estudos realizados por Flizikowski (2012), com intuito de contribuir com o meio ambiente e minimizar o aquecimento global e as mudanças climáticas. Técnicas como restauração florestal, recuperação de áreas degradadas e reflorestamento utilizando espécies exóticas para realizar essas compensações de GEEs. Contudo, estudos mais aprofundados devem ser realizados antes de introduzir espécies de outras regiões. O plantio de árvores exóticas podem ser consideradas invasoras ocasionado problema para a conservação da biodiversidade local.

Conforme estudos realizados por Lima et al. (2018) e Maciel (2016), o m² de construção civil convencional de concreto/alvenaria produz em média 229 kg de dióxido de carbono lançados na atmosfera; para realizar a compensação dessas emissões, tendo como base a média de 184,24 kg de dióxido de carbono que uma árvore pode retirar da atmosfera ao longo de seus primeiros 20 anos e considerado o clima, região e qualidade do terreno em que foram desenvolvidos os estudos, seria necessário o plantio de 1,25 árvore para compensar as emissões de 1 m² da construção civil.

Segundo Rica (2011), o projeto de plantar árvores deve ser o último passo do processo. Primeiro é necessário mudar de atitude e reduzir, e muito, as emissões de CO₂. No entanto, é essencial que se pense no plantio de árvores como alternativa de compensar as emissões de gases de efeito estufa, depois de realizar todas as possibilidades de redução efetiva de emissões dos GEE.

Uma forma de redução efetiva de emissões poluentes é realizar estudos metodológicos com objetivo de repensar o processo, analisar e avaliar o ciclo de vida do produto, objetivando melhorias ambientais como substituição de insumos, materiais ou processos que apresentem menores cargas ambientais, reduzindo a quantidade de emissões poluentes lançadas na atmosfera.

2.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) é uma ferramenta que permite avaliar o consumo de energia incorporado um produto, processo ou serviço ao longo de seu ciclo de vida. Na construção civil, a ACVE pode ser aplicada para avaliar a eficiência energética e o desempenho ambiental de um material ou edifício.

A ACVE pode ser utilizada em várias fases do ciclo de vida do edifício, desde a escolha dos materiais e sistemas de construção mais eficientes, até a fase de operação do edifício, para avaliar o desempenho energético de um material ou edifício. Dessa forma, a ACVE permite a avaliação do consumo de energia e a identificação de oportunidades de melhoria em cada fase do ciclo de vida.

Muitos dos relevantes impactos ambientais gerados pela construção civil são causados pelo uso de recursos energéticos na extração das matérias-primas, produção, transporte e operação. Esse consumo energético do ciclo de vida da edificação e materiais de construção pode ser mensurado através da metodologia de avaliação do ciclo de vida energético (ACVE).

A metodologia de ACVE aplicada ao setor da construção civil, especificamente no setor de materiais, pode ser mais bem compreendida e estudada como a mensuração do consumo de energia ao longo do ciclo de vida do produto, quantificando toda a energia gasta na sua produção, o que originou o termo “avaliação do ciclo de vida energético”.

Na ACVE é contabilizado o consumo energético de um produto ou processo, incluindo a energia elétrica e combustíveis fósseis utilizados para a sua produção.

Esta energia incorporada aos materiais e componentes construtivos está diretamente ligada aos impactos ambientais como consumo de energia primária, potencial de aquecimento global, eutrofização, acidificação das águas e outros.

A energia incorporada é uma forma de mensurar os impactos ambientais na construção civil, e é um fator importante para a tomada de decisões quanto à escolha de materiais. Por definição, a energia incorporada nos materiais de construção (*embodied energy*) é a soma de toda a energia necessária para produzir quaisquer bens ou serviços, considerando como se essa energia fosse absorvida ou incorporada no próprio produto, abrangendo a energia consumida durante todo ciclo de vida do material, componente ou construção.

A procura por formas de aumentar a eficiência energética dos materiais de construção tem sido assunto frequente nas discussões nacionais e internacionais. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2020), foi observado que as edificações habitacionais brasileiras correspondem por aproximadamente 10,3% do consumo de energia do país no ano de 2019.

A redução do consumo energético possui um papel fundamental para a construção sustentável, uma vez que o alto consumo mundial de energia é uma das principais causas para o desenvolvimento insustentável do planeta. Dentro desse contexto, assume fundamental importância a quantificação e mensuração da energia incorporada nos materiais de construção através da ACVE.

A avaliação de ciclo de vida energético (ACVE) pode ser definida como uma técnica em que os consumos energéticos mais importantes (ASDRUBALI; GRAZIESCHI, 2020) – em forma de energia elétrica, térmica e combustíveis fósseis empregados em produto ou processo – são contabilizados, resultantes dos insumos energéticos necessários para as etapas referentes ao processo de extração e fabricação, transporte dos materiais e componentes, além das etapas de execução, operação, manutenção, demolição e destinação final de resíduos (CALDAS et al., 2016); (ZABALZA et al., 2011).

Esses fluxos elementares de entradas e saídas provocam potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, como potencial de aquecimento global (ROH et al., 2020); (BUENO et al., 2016), geração de resíduos, acidificação das águas e etc.

A ACV tem sido utilizada para a avaliação do desempenho ambiental de diversos processos e produtos, inclusive aqueles ligados ao setor da construção civil (CALDAS et al., 2020). Esses estudos buscam sempre a sustentabilidade para a construção civil (SILVA; MELO, 2020), e um equilíbrio entre produção e impactos ambientais.

O consumo energético empregado na indústria de construção pode ser avaliado através do ciclo de vida energético (ACVE). De acordo com estudos de Pilz e Macedo (2020) e Pedroso (2016), a ACVE é uma abordagem em que todos os consumos energéticos de um produto ou processo são contabilizados, o que corresponde a todas as necessidades energéticas do ciclo de vida em estudo.

A importância do termo energia incorporada (EI) nos materiais de construção é resultante dos insumos energéticos necessários para as etapas referentes ao processo de fabricação, transporte e outros insumos indiretos (AZEVEDO; GERALDI; GHISI, 2020); (ALVAREZ; RIPOLL MEYER, 2019); (SPOSTO; CALDAS; NABUT, 2016), além da fase de uso, manutenção, disposição final e/ou reciclagem, na qual a energia incorporada deve ser mensurada (DASCALAKI et al., 2021) para uma quantificação e avaliação de seus respectivos impactos ambientais.

Entender sobre a quantidade de energia em um material da construção é interessante para tomar decisões de especificação em projetos mais conscientes. Um material sustentável em uma localidade pode ter uma carga energética alta em outro, por conta da disponibilidade local e do tipo de transporte envolvido.

A parcela da energia de transporte varia segundo o modo de transporte utilizado: aéreo, marítimo, ferroviário ou rodoviário. Desse modo, deve-se privilegiar a utilização de materiais locais, como forma de reduzir a sua energia incorporada. A energia gasta na construção de um edifício pode ser reduzida em 17% apenas pela escolha adequada dos materiais de construção (TORGAL, F.; JALALI, 2010); a redução da energia incorporada em uma edificação está associada às especificidades da construção.

O consumo energético relacionado à produção dos materiais depende da especificidade de cada processo produtivo, variando de acordo com a localidade na qual o material é produzido; tal panorama torna evidente a necessidade de se utilizarem materiais locais, como forma de reduzir a sua energia incorporada (TORGAL, F.; JALALI, 2010).

A pesquisa realizada por Dimoudi e Tompa (2008) relata que a energia incorporada nos materiais de construção de edifícios construídos pode variar de 13% a 19% da energia incorporada na construção e operação, para uma vida útil do edifício de 50 anos. Esse consumo de energia por área útil de construção pode ser mensurado em 3,27 GJ/m² de energia incorporada.

2.7 DECLARAÇÃO AMBIENTAL DE PRODUTO - DAP

Declaração Ambiental de Produto - DAP (do inglês *Environmental Product Declaration - EPD*) é uma rotulagem ambiental que fornece informações técnicas de um produto com base nos resultados de uma ACV (AZARIJAFARI et al., 2021); (LAURI et al., 2020).

Para avaliar todos os impactos ambientais relacionados a um produto da construção civil, é necessário que se avalie todas as fases de seu ciclo de vida. Para isso, propõe-se a aplicação da ACV (PESTA et al., 2020), uma metodologia internacionalmente consagrada na avaliação ambiental de produtos, processos e serviços, sendo também normatizada para declarações ambientais de produtos e materiais construtivos (PASSUELLO et al., 2014).

A declaração ambiental de produto (DAP) é uma rotulagem tipo III, referenciada pela ABNT NBR ISO 14025:2006, que torna público o perfil ambiental de um produto e/ou serviço em atendimento aos requisitos de um programa de rotulagem. A DAP é um atestado de que o produto está engajado no contexto de desempenho ambiental de produtos, que atua de forma transparente no que diz respeito aos impactos de sua cadeia produtiva e que possui responsabilidade socioambiental.

A preocupação com problemas ambientais tem sido cada vez mais frequente por parte de consumidores finais (SANTOS; MACHADO, 2016). Em pesquisa realizada pela Capgemini Research Institute, que entrevistou 7.500 consumidores em todo o mundo para entender suas preferências, comportamentos e expectativas sobre sustentabilidade, demonstrou-se que 79% dos consumidores estão mudando a sua preferência de compra

com base em critérios de responsabilidade social e ambiental dos fabricantes (ENCICLO, 2020).

Estudos demonstram que os consumidores estão dispostos a pagar mais por um produto mais sustentável quando comparado a outros produtos da mesma categoria. Os rótulos ambientais podem auxiliar os consumidores em suas decisões, fornecendo essas informações (CHEN; ALFNES; RICKERTSEN, 2014).

Segundo Hoe e Pires (2017), uma pesquisa realizada no Brasil pela empresa Market Analysis no ano de 2014 sobre o interesse dos consumidores em saber sobre os possíveis impactos ambientais dos produtos registrou um percentual de 73% de consumidores interessados em incluir, em suas listas de compras, produtos com menores impactos ambientais. A mesma pesquisa determinou que 36% dos consumidores gostariam que os produtos tivessem uma certificação para atestar sua produção sustentável.

No decorrer do tempo, pode se observar um aumento na preocupação dos consumidores nas escolhas de seus produtos. Estudo realizado na França mostra que em 1993 apenas 36% da população se preocupava com as questões ambientais; já em 2011, esse número havia aumentado para 53% (CECI-RENAUD; KHAMSSING, 2012). Na Europa, em 2013, um estudo demonstrou que 81% da população europeia gostaria de encontrar informações ambientais nos rótulos dos produtos (HOE; PIRES, 2017).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) passou de um exercício acadêmico para uma ferramenta de tomada de decisão, aceita e utilizada para a gestão da sustentabilidade ambiental e de produtos e empresas. Várias empresas, como a Apple e a Unilever, empregam essa ferramenta nas ações voltadas à sustentabilidade. Tanto em produtos estabelecidos como no desenvolvimento de outros novos, a ACV dá suporte às ações sustentáveis na cadeia produtiva e no processo de inovação, agregando valor ao produto junto à percepção dos possíveis clientes ou segmentos restritos do mercado consumidor.

O setor de construção civil é frequentemente alvo de críticas devido aos impactos associados à extração de matéria-prima, uso de energia não renovável e geração de resíduos, fatores preponderantes em vários tipos de impactos ambientais. A declaração ambiental do produto (DAP) pode ajudar o setor a reduzir seus impactos e desenvolver novas formas de comunicação com o consumidor tão exigente.

2.7.1 DAP - Tipo III

Em 2015 a Organização das Nações Unidas (ONU) promoveu a Agenda 2030 de desenvolvimento sustentável. Esta agenda consiste no limiar da sustentabilidade, contemplando 17 objetivos denominados como Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Seu objetivo de número 12, conhecido como ODS 12, trata do consumo e produção responsável, compreendendo 11 metas como: até 2030 a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais deve ser alcançada (ONU, 2016).

A Figura 22 apresenta o 12º objetivo, “produção e consumo sustentáveis”, da Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável, que contempla 17 objetivos e 169 metas.

Figura 22 Produção e consumo sustentáveis



Fonte: (ONU, 2016)

Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis é como o ODS 12 é abordado pela ONU, tendo como princípio aprimorar a forma de produção da indústria, mas também requer apoio e orientação aos consumidores na busca por formas mais sustentáveis de consumir. É nesse contexto que a declaração ambiental de produtos tipo III se estabelece, com objetivo de orientar o consumidor sobre os possíveis impactos da produção e uso de determinados produtos.

Esse tipo de declaração ambiental demanda um estudo de ACV, para que os produtos possuam o detalhamento dos impactos ambientais referentes a cada um dos seus elementos constituintes. Também existem as Regras de Categorias de Produtos (RCP), as quais proveem orientações metodológicas para um grupo de produtos, visando harmonizar premissas, conceitos e modelos.

2.7.2 Importância da rotulagem ambiental

Nos últimos anos, percebe-se como o mercado tem mudado de postura na hora de especificar ou escolher os materiais ou produtos que vão compor a sua obra, projeto ou edifício (OLIVEIRA et al., 2020). As declarações ambientais de produto possuem o propósito de demonstrar de forma clara e transparente os impactos ambientais relacionados ao produto em cada etapa do seu ciclo de vida.

Por meio dessa demonstração, os fabricantes permitem que os compradores ou especificadores estejam aptos a decidir pela compra de um ou outro produto com base nessas informações. Por isso é tão importante que os produtos sejam avaliados seguindo uma mesma regra, uma mesma metodologia, um mesmo critério.

A principal finalidade de uma DAP é facilitar a comunicação, por meio de informações transparentes, precisas e confiáveis, dos impactos potenciais de um produto ao longo de seu ciclo de vida. A sua importância para a construção sustentável está no aumento do poder de decisão no momento de desenvolvimento de um novo projeto.

A DAP exige uma ACV, que por sua vez irá detalhar todos os processos que compõem a cadeia de produção. O nível de detalhamento da AICV fornece ao estudo informações valiosas das etapas nas quais podem ocorrer desperdícios de materiais e/ou ineficiência deles, indicando caminhos para a redução dos custos operacionais ou possíveis substituições de materiais com menores impactos ambientais, o que pode refletir em um preço de mercado mais competitivo e atrair novos nichos.

Com a DAP, é possível dar ao consumidor o poder de escolher a opção que represente uma maior sustentabilidade. Compreender a influência de um produto do ‘berço ao berço’ permite identificar a realidade em termos de redução de impactos ambientais.

2.8 PAVIMENTO INTERTRAVADO

2.8.1 Histórico da origem e aplicação do pavimento intertravado

Pode-se dizer que o pavimento intertravado está presente na construção civil desde a antiguidade. O pavimento intertravado tem sua origem nos pavimentos revestidos com pedras, executados na Mesopotâmia há quase 5.000 anos e muito utilizados pelos romanos desde 2.000 a.C. (LEAL, 2018); (ABCP, 2010).

Os romanos foram uma das primeiras civilizações a construir vias, estradas, ruas e calçadas pavimentadas, utilizando blocos de pedras encaixados. Onde se colocava uma fileira de blocos para formar a borda da calçada, em seguida cavava-se uma valeta mais profunda entre as duas bordas, que era preenchida por camadas de pedras cada vez menores. A camada superior formava o revestimento da estrada, levemente abaulada no centro para que a água da chuva escoasse para as valetas (MACAULAY, 1989).

As estradas e ruas eram feitas de pedras planas cuidadosamente unidas, e todas as fendas eram preenchidas com pedras menores. A Figura 23 e a Figura 24 demonstram as técnicas construtivas romanas.

Figura 23 Construção de uma estrada romana



Fonte: (MACAULAY, 1989, página 27)

Figura 24 Rua de uma cidade romana



Fonte: (MACAULAY, 1989, página 45)

César sabia que uma cidade não deve ser apenas um centro comercial, político e religioso, mas também - e principalmente - um lugar onde as pessoas sintam vontade de morar. Foi essa a ideia que guiou os arquitetos das centenas de cidades romanas fundadas entre 300 a.C. e 150 d.C. (MACAULAY, 1989, página, 113).

As estradas e ruas romanas eram uma infraestrutura física vital para a manutenção e desenvolvimento do Estado Romano, e eram construídas para conectar cidades e bases militares através da expansão e consolidação da República Romana.

Elas forneceram meios eficientes para o movimento terrestre dos exércitos, de funcionários do governo e de civis, além de comunicações oficiais e bens de comércio. As estradas pavimentadas construídas pelos romanos proporcionavam segurança e conforto na movimentação de pessoas e mercadorias (LEÃO, 2015). A Figura 25 apresenta uma típica rua romana pavimentada, nos dias de hoje.

Figura 25 Visão de uma rua romana nos dias de hoje, Pompeia em Nápoles, Itália.



fonte: (BIANCARDO et al., 2020, página 41)

Esse tipo de pavimento evoluiu primeiro para o uso de pedras talhadas, resultando em pavimentos conhecidos como paralelepípedos, e as dificuldades da produção artesanal dessas pedras, além da falta de conforto de rolamento, impulsionaram o desenvolvimento das peças de concreto pré-fabricadas produzidas até os dias de hoje (ABCP, 2010).

O pavimento intertravado é composto por peças de concreto assentadas sobre camada de areia e travadas entre si por contenção lateral. O intertravamento é fundamental para o desempenho e a durabilidade do pavimento. Para que se consiga o intertravamento, duas condições são necessárias e indispensáveis: contenção lateral e junta preenchida com areia (ABCP, 2010). A Figura 26 apresenta o pavimento intertravado de concreto produzido nos dias de hoje.

Figura 26 Máquina vibro-compressora



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos dias atuais, a produção e uso do pavimento intertravado de concreto são regulamentados por normas e decretos. Sua aplicação em empreendimentos habitacionais, paisagísticos e de infraestrutura em Brasília é regulada conforme Lei nº 4.059 (2007), que dispõe sobre a pavimentação ecológica nos condomínios no âmbito do Distrito Federal e de outras providências, e o Decreto nº 38.047 (2017), que se refere às normas viárias e aos conceitos e parâmetros para o dimensionamento do sistema viário urbano do Distrito Federal.

O pavimento intertravado de concreto possui características que vão ao encontro dos desafios que enfrentamos (mudanças climáticas, escassez de recursos naturais, perda da biodiversidade, crise hídrica): permite uma maior infiltração das águas pluviais no solo (OLIVEIRA; SALLES, 2020), ajudando a abastecer os lençóis freáticos, e reduz a formação de ilhas de calor nas cidades, por refletir a luz solar (SOUSA et al., 2017).

A coloração mais clara e homogênea do pavimento intertravado de concreto, em relação aos outros tipos de pisos mais escuros, reduz significativamente a absorção de calor pela superfície do pavimento, melhorando o conforto térmico e diminuindo a formação das ilhas de calor nos grandes centros urbanos (ARAÚJO; DOURADO, 2020); (OLIVEIRA, 2018).

Além do conforto térmico, o pavimento oferece a capacidade de poupar energia elétrica, por ser capaz de aumentar a reflexão da luz devido à coloração clara dos pavimentos de assentamento; esse ganho é em torno de 30% se comparado ao pavimento de concreto asfáltico (OLIVEIRA, 2018).

2.8.2 Processo de fabricação e execução de pavimento intertravado de concreto

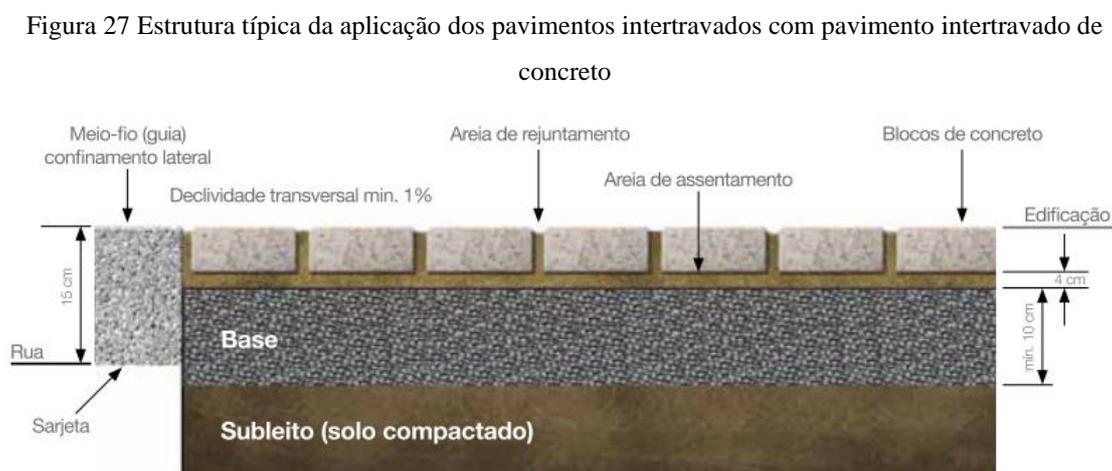
Para a produção do pavimento intertravado de concreto, podem ser utilizadas duas opções: a vibro prensa, que utiliza uma mistura mais seca dos materiais, ou a fabricação das peças em fôrmas de plástico. O uso da fôrma de plástico possibilita uma dosagem do concreto de consistência plástica, propiciando sua confecção sem a necessidade das vibro prensas, em geral utilizadas na produção das peças de pavimento intertravado. O uso das fôrmas plásticas tem por finalidade viabilizar uma alternativa às pequenas empresas de artefatos de cimento.

Os pavimentos intertravados de concreto produzidos industrialmente em vibro prensas proporcionam uma compactação adequada das peças, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade. Após a moldagem na vibro prensa, as peças são curadas em câmaras úmidas que mantêm constante a umidade relativa acima dos 95%. Isto garante a hidratação do cimento e proporciona menor absorção de água da peça, que deve ser menor ou igual a 6%.

O período de cura do pavimento intertravado de concreto na câmara úmida gira em torno de 24 horas, e a cura final ocorre no pátio e depende de algumas condições industriais, ficando entre 7 e 28 dias no pátio até sua entrega ao consumidor. As peças já chegam prontas à obra e o processo industrializado garante ainda a uniformidade de cor, textura e dimensões das peças.

A norma brasileira ABNT NBR 9781:2013 estipula que a resistência à compressão estimada das peças, calculada de acordo com a ABNT NBR 9780:1987, deve ser de 35 MPa para as solicitações de veículos comerciais de linha ou 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

As peças de concreto do pavimento intertravado devem possuir dimensões uniformes, compactação adequada de todo o conjunto e juntas pequenas entre elas, preenchidas com areia fina. Se as peças não forem uniformes, não se conseguirá o assentamento adequado. As juntas devem ter abertura de em torno de 3 mm e estar sempre preenchidas com areia. A Figura 27 demonstra a estrutura típica da aplicação dos pavimentos intertravados.



Fonte: Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público (ABCP, 2010, página 15)

Subleito: Constituído de solo natural ou proveniente de empréstimo (troca de solo), deve ser compactado em camadas de 15 cm, dependendo das condições locais.

Base: Constituída de material granular com espessura mínima de 10 cm, a camada deve ser compactada após a finalização do subleito.

Camada de assentamento: Camada composta por material granular, com distribuição granulométrica definida, que tem a função de acomodar as peças de concreto, proporcionando correto nivelamento do pavimento e permitindo variações na espessura das peças de concreto. A areia de assentamento nunca deve ser usada para corrigir falhas na superfície da camada de base.

Camada de revestimento: Camada composta pelas peças de concreto e material de rejuntamento, e que recebe diretamente a ação de rolamento dos veículos, tráfego de pedestres ou suporte de cargas.

Os pavimentos intertravados de concreto destacam-se pela simplicidade no processo de construção e manutenção. Além disso, podem ser observadas a facilidade de estocagem, homogeneidade das peças, menor impermeabilidade do solo – uma opção intermediária entre o pavimento rígido e o flexível. Trata-se de uma construção ecologicamente correta, que aumenta a percolação da água no solo, diminui os riscos de enchentes e contribui com a recomposição das reservas subterrâneas de água (SOARES et al., 2020).

2.8.3 Representatividade histórica

O bloco de pavimento intertravado é um componente construtivo que está sendo utilizado pela humanidade há tempos. Durante o Império Romano, utilizou-se um conceito semelhante para a pavimentação de vias (ruas e estradas). As pedras brutas deram origem aos primeiros pavimentos desse tipo; mais tarde, os romanos passaram a se utilizar de pedras talhadas manualmente, moldadas para que houvesse melhor ajuste entre elas.

Essas estradas e ruas construídas com pedras encaixadas possibilitaram a expansão do Estado Romano pela Europa, que disseminou sua identidade e cultura no ocidente, presentes até hoje, através da expansão territorial, intercâmbio econômico e cultural e outros fatores como arquitetura, engenharia, planejamento urbano, artes e linguagem.

2.8.4 Evolução tecnológica

Observa-se uma evolução tecnológica no pavimento de pedra para pavimentação: inicialmente, eram utilizadas pedras encaixadas umas às outras, obtendo o melhor encaixe entre elas, executadas na Mesopotâmia há quase 5.000 anos, (LEAL, 2018), e posteriormente pelos Romanos em 2.000 a.C., utilizando pedras talhadas manualmente para que houvesse melhor ajuste entre elas. Já nos dias atuais, há a produção industrial do pavimento intertravado de concreto moldado na forma desejada.

O pavimento intertravado de concreto conquistou popularidade nas décadas de 80 e 90 por ser uma alternativa prática, versátil e econômica, quando comparada a outros tipos de pavimentação. O crescimento da preocupação ambiental e da importância das questões de sustentabilidade no mercado da construção civil contribuiu para o desenvolvimento desse tipo de pavimentação.

2.9 UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO EM CONCRETO

Conforme o CONAMA (2002), os entulhos de concretos e argamassa são classificados como classe A e são passíveis de reciclagem, podendo ser classificados como agregados miúdos e graúdos, ou “areia e brita”, que, além dos materiais do resíduo de construção como o agregado reciclado de concreto (ARC), são os mais promissores para reciclagem e produção de agregados para a indústria da Construção Civil.

O crescente interesse no estudo da reciclagem dos resíduos de construção e demolição, de forma a reaproveitar os agregados reciclados do concreto ARC na produção de novo concreto, fomenta várias pesquisas (COLANGELO et al., 2020); (CAMPOS et al., 2018); (BRAVO et al., 2015).

Normas técnicas a respeito do uso de agregados reciclados em concretos podem ser observadas em 11 países além do Brasil: Alemanha, Holanda, Bélgica, Espanha, Suíça, Áustria, Inglaterra, Austrália, Hong Kong, Japão e EUA (ALBERTE; HANDRO, 2021), (PAULA, 2016). A Tabela 14 apresenta especificações de uso do agregado reciclado nesses países.

Tabela 14 Especificações de uso do para agregado reciclado oriundos de RCD em diferentes países.

País	Norma	Aplicação do agregado reciclado
------	-------	---------------------------------

		Ano	Pavimentos	Concreto	Argamassa	Terraplenagem	Outros
Brasil	(NBR ABNT 15115, 2004)	2004	X				
	(ABNT NBR 15116, 2024)	2004	X	X			
	(ABNT NBR 15116, 2021)	2021		X	X		
Alemanha	(DIN 4226-100 E, 2002)	2002		X			
Áustria	(ACMRA, 2004)	2004	X				X
Austrália	(CSIRO HB 15, 2002)	2002	X	X			
	(DPTISA, 2001)	2001	X			X	
Bélgica	(OICPPC, 2016)	2016			X	X	
	(NBN B 15-001, 2006)	2006		X			
Espanha	(MF EHE-08, 2008)	2008		X			
Estados Unidos	(MDT, 2012)	2012	X	X			
	(TDTS - 421, 2014)	2014	X				
	(FDT, 2014)	2017		X			
Holanda	(RNSI N - 590, 2005)	2005		X			
Hong Kong	(DBGHK, 2002)	2002	X	X			
Inglaterra	(BS 8500-2, 2006)	2006		X			
	(BRE - 433, 1998)	1998		X			
Japão	(JIS A 50 21, 2005)	2005		X			
Suíça	(SARTE SN 670 062, 1998)	1998	X		X		

Fonte: adaptado (ALBERTE; HANDRO, 2021)

Gomes et al. (2015) relatam em seu experimento que o agregado reciclado de concreto apresenta uma pasta de cimento porosa aderida à superfície do agregado reciclado, mesmo após o processo de britagem. Desta forma, não é possível identificar a forma do agregado natural, devido à quantidade de argamassa na superfície do agregado reciclado, denominada argamassa residual ou argamassa aderida.

Essa argamassa residual pode envolver o agregado reciclado por completo, modificando suas propriedades físicas e mecânicas, como massa específica, massa unitária, resistência à compressão e absorção.

2.9.1 Reciclagem do agregado reciclado de concreto

A escolha em relação ao processo de fragmentação e britagem do material é crucial para estabelecer as condições mais favoráveis economicamente para a reciclagem de ARC e sua utilização na produção de concretos ou materiais construtivos (GOMES et al., 2015).

O processo de britagem do ARC pode ser uma alternativa para se obter agregados reciclados com características apropriadas para o uso em concreto. Estudos realizados por Gomes et al. (2015) demonstraram que a fragmentação de agregados por diferentes processos reduz a porosidade do material, e, muitas vezes, favorece a obtenção de agregados com características similares às do material natural (CORDEIRO et al. 2017).

Com base nos estudos de Gomes et al. (2015), o processo de britagem em várias fases produz agregados com menor quantidade de argamassa aderida, “argamassa residual”. Essa argamassa se desprende devido à moagem do mecanismo de atrito causando um aumento na quantidade de finos. Esses finos provenientes da argamassa de concreto, quando reciclados, contêm finos em fase anidra, ou não hidratada.

Esses resultados podem ser relacionados ao consumo de cimento nos concretos estruturais de aproximadamente 350 kg/m³ (SILVA, 2012) e que devido à falta de controle tecnológico na produção do concreto a a/c não consegue hidratar 100% do aglomerante hidráulico, ficando assim uma pequena parcela na mistura do concreto em fase anidra.

Do ponto de vista técnico, as possibilidades de reciclagem dos resíduos variam de acordo com a sua composição. Frações compostas predominantemente de concretos estruturais e de rochas naturais podem ser recicladas como agregados para a produção de concretos estruturais (FERREIRA, 2013).

A presença de fases mais porosas e de menor resistência mecânica, como argamassas, produtos de cerâmica vermelha e de revestimento, provoca uma redução da resistência dos agregados e um aumento da absorção de água.

2.9.2 Bloco de Pavimento Intertravado de Concreto com Agregado Reciclado

A destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD) é um problema que se agrava com o crescimento dos centros urbanos e afeta diretamente as condições ambientais, com consequências para toda a sociedade. Atualmente, inúmeras pesquisas têm sido realizadas com objetivo de minimizar o impacto ambiental desses resíduos; (AUGUSTO JUNIOR et al., 2017) estudou a utilização de agregados reciclados na composição do concreto para a confecção de pavimento intertravado de concreto. A fabricação de artefatos de concreto com agregados reciclados é uma alternativa para minimizar os impactos ambientais da crescente geração de resíduos na construção civil.

Estudos foram realizados por Fernandes (2020), em pavimento intertravado de concreto permeável produzidos com agregados reciclados, utilizando variação dos teores de argamassa em 35% e 40% e variação dos teores de substituição de agregados de RCD em 15% e 30%, para ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água, índice de vazios e permeabilidade. Em seus ensaios, os resultados mostraram boa capacidade mecânica dos concretos permeáveis, com todos os concretos estudados atingindo resistências à compressão e à tração satisfatórias.

Soares et al., (2020) realizaram um estudo de substituição do agregado, uma temática que vem sendo discutida amplamente pelos diversos setores da construção civil sobre o uso dos RCDs em artefatos de concreto. Em seus estudos é analisada a substituição de agregados tradicionais por agregados reciclados, incorporados na produção de pavimento intertravado de concreto.

Em sua pesquisa, é realizada uma análise criteriosa dos resultados obtidos em oito trabalhos acadêmicos, referentes à substituição de algum dos agregados para confecção do pavimento intertravado de concreto, no qual foram incorporados resíduos da construção e da demolição (SOARES et al., 2020). Nos estudos analisados, os autores utilizaram diferentes percentuais de substituição do agregado graúdo e miúdo e traço de dosagem. A Tabela 15 apresenta as pesquisas realizadas com agregado reciclado para produção do pavimento intertravado de concreto.

Tabela 15 Pesquisas realizadas com agregado reciclado para produção do pavimento intertravado de concreto

Autor	Título	Materiais utilizados	substituído	Teor (%)	Traço
Soares et al. (2009)	Intertravados de concreto fabricados com utilização de Resíduos de construção e demolição (RCD)	Cimento Portland (CP I-32); Agregados Convencionais; Agregado miúdo de concreto reciclado.	Agregado miúdo	25 e 50	25% de resíduo 1: 1,36: 2,55 a/c 0,45 50% de resíduo 1: 0,91:2,55 a/c 0,91
Amadei (2011)	Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduo de construção e demolição do município de Jurandá/ PR	Cimento Portland (CP V-ARI); Agregados Convencionais; Areia Reciclada de RCD.	Agregado miúdo	25, 30, 35, 40, 45 e 50	1,35:a/c 0,32 a 0,4 variando de acordo com a adição de resíduo
Köhler (2013)	Desempenho técnico de blocos de concreto para pavimento intertravado com resíduo de construção e demolição	Cimento Portland (CPV-ARI); Agregados convencionais; Areia reciclada de resíduo vermelho.	Agregado miúdo	25, 50, 75 e 100	1: 1,74: 2,15 a/c 0,51
Brotti (2014)	Contribuição ao estudo de resíduos de construção e demolição (RCD) visando à fabricação de peças de pavimentação	Cimento Portland (CPV-ARI); Aditivo incorporador de ar (MICRO AIR EC); Agregados convencionais; Areia reciclada.	Agregado miúdo	20, 40, 60, 80 e 100	1: 5,03: 1,26 a/c 0,46 a 0,50 variando de acordo com a adição de resíduo 0,35% de aditivo incorporador de ar
Santos (2014)	Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil – RCC e fibras de aço	Cimento Portland (CPV-ARI); Agregados convencionais; Aditivo; Areia reciclada de resíduo cinza;	Agregado miúdo	15, 20, 25 e 50	1: 0,77: 2,33: 1,11 40 kg/m ³ de fibras de aço a/c 0,43 1% de aditivo superplastificante
Fernandes (2015)	Resíduos da construção civil e demolição – RCD – como agregado para o concreto.	Cimento Portland (CPV-ARI); Agregados convencionais; Aditivo; Brita de RCD.	Agregado graúdo	25, 50, 75 e 100	1: 2,59: 2,71 a/c 0,59 1,5% de aditivo superplastificante

Pederneiras (2017)	Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de Resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal/RN	Cimento Portland (CP II-Z-RS), Agregados convencionais; Aditivo líquido de alto desempenho (Sika Paver HC10); Areia reciclada de RCD; brita reciclada de RCD.	Agregado miúdo e graúdo	100	1: 6: 2 a/c 0,4
Leal (2018)	Peças para pavimento intertravado de Concreto: Estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado	Cimento Portland (CPV-ARI); Agregados convencionais; Aditivo; Areia reciclada de resíduo cinza.	Agregado miúdo	10, 20 e 30	1: 3,18: 2,70: 1,33 a/c= 0,62 1% de aditivo superplastificante

Fonte: Adaptado de Soares et al. (2020)

Para os trabalhos aqui apresentados, a adição de RCD na composição do concreto teve influência direta na quantidade de água a ser adicionada na massa, para garantir a trabalhabilidade. Portanto, devido a esse aumento do teor de água, a resistência do concreto tende a diminuir. Além disso, percebe-se que o percentual de adição do resíduo é variável em cada estudo, o que dificulta uma padronização de possível sugestão para uma produção em grande escala de pavimento intertravado de concreto (SOARES et al., 2020).

Em estudos realizados por Leal (2018) – em 3 dosagens utilizando 10%, 20%, 30% de substituição em massa da areia natural pela areia reciclada, produzidas em escala industrial e com o uso de máquina vibro prensa, e avaliadas aos 7 e 28 dias, submetidos a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, abrasão e absorção de água, os resultados demonstraram que os traços contendo agregados reciclados tiveram desempenho superior ao concreto de referência.

Para os resultados de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, os melhores resultados foram obtidos com 20% de areia reciclada, atendendo aos limites mínimos exigidos pelas normas brasileira ABNT NBR 9781:2013 e britânica BS EN 1338:2003. Todos os traços atenderam aos limites de abrasão propostos pelas normas, sendo o menor desgaste superficial constatado nas peças com 10% de resíduo. Para a

absorção de água, os melhores resultados foram fornecidos pelos traços com 10% e 20% de substituição (LEAL, 2018).

2.10 TIPOS DE CIMENTO PRODUZIDOS NO BRASIL

No Brasil existem alguns tipos específicos de cimento, cuja composição e fórmula são completamente diferentes de acordo com cada finalidade do aglomerante. Cada um deles é projetado e fabricado para um tipo de construção, e o uso adequado do aglomerante com objetivo de aproveitar o máximo de sua eficiência física e mecânica pode aumentar sua durabilidade, rendimento, diminuir seu custo e apresentar menor impacto ambiental.

Diferentes tipos de cimento são utilizados para os mais diversos fins dentro da construção civil. Podemos classificar os aglomerantes em composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI).

Segundo estudos realizados por Lins (2017), o Brasil possui um dos melhores desempenhos ambientais na produção de cimento Portland; os resíduos de outros segmentos, como o filler, pozolana e escória, são consumidos por completo pela indústria cimenteira, sendo utilizados na fabricação dos cimentos CII-E, CII-Z, CII-F e CIII (LINS, 2017); (BATTAGIN, 1987).

A substituição parcial de cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS) vem se mostrando eficiente na produção de cimentos com menores impactos ambientais (FRÖHLICH, 2019).

Estudos promissores ao redor do mundo viabilizam o uso dos materiais cimentícios suplementares em substituição ao clínquer. Em 2015 aconteceu a 1ª Conferência Internacional sobre Argilas Calcizadas para Concreto Sustentável em Lausanne, na Suíça, e como resultado foi publicado o livro *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, contemplando 116 artigos abordando argila calcinada, filler calcário, cimento LC³ e outras pesquisas sobre sustentabilidade do concreto (SCRIVENER; FAVIER, 2015).

2.10.1 Substituição do clínquer

Com o intuito de amenizar impactos ambientais gerados no processo de fabricação do cimento, a redução do teor de clínquer na sua composição final vem sendo uma alternativa estudada em diversos países pelo mundo, como na Suíça, Índia, Cuba, EUA, China e

Brasil. Dessa forma, a utilização de adições minerais em substituição ao teor de clínquer vem sendo cada vez mais aplicada na busca de cimentos sustentáveis (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020).

Os estudos acerca dos cimentos ternários constituídos de argila calcinada, calcário e clínquer, conhecidos como cimentos LC³, ganharam força ao longo dos últimos anos, e pesquisas recentes (LIN et al., 2021); (MUZENDA et al., 2020); (BARBALHO et al., 2020); (MOREIRA; REGO, 2020) demonstraram que o uso combinado desses materiais na mistura do cimento para produção de concreto é viável, sendo um forte aliado para a redução da pegada ambiental na construção civil (ZHANG et al., 2020).

O Brasil é atualmente uma das referências mundiais na redução da quantidade de clínquer/cimento. Para tanto, diferentes adições minerais são usadas para substituir o clínquer na produção de cimentos, e também vêm sendo desenvolvidos vários estudos para elevar ainda mais o uso dessas adições, o que representa a principal alternativa e desafio do setor na mitigação de suas emissões (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020).

Cerca de 60% das emissões totais de CO₂ decorrentes da produção de cimento Portland são provenientes da calcinação do carbonato de cálcio, processo também conhecido como “descarbonatação”, que posteriormente dá origem ao clínquer. Diante dessa grande parcela de contribuição na emissão de gás carbônico, a redução da proporção clínquer/cimento se torna imprescindível para que o processo produtivo tenha seu impacto ambiental atenuado (LINS, 2017).

Nesse contexto, vários estudos têm sido realizados (LIN et al., 2021); (YU; WU; LEUNG, 2020); (PILLAI et al., 2019); (CANCIO DÍAZ et al., 2017); dentre outros resultados, relatam a viabilidade e benefícios das adições da argila calcinada e filler calcário ao cimento, dando origem ao chamado cimento LC³ (LINS, 2017).

Pesquisas realizadas por Barbalho, Silva e Rêgo (2020) indicam a viabilidade técnica do bom desempenho obtido pelo cimento LC³, com a capacidade de substituir até 45% da quantidade do clínquer, e estudos realizados por (MOREIRA; REGO, 2020) também relatam a substituição do clínquer em 45% (30% de argila calcinada e 15% de filler calcário), criando o cimento LC³.

O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituição de parte do clínquer no cimento é uma estratégia promissora para redução das emissões de CO₂ na indústria da construção civil. As misturas em que a argila calcinada é usada como pozolana costumam ter teores de clínquer em torno de 76%. Já a combinação de argila calcinada com calcário permite níveis mais elevados de substituição, até teores de clínquer de cerca de 50% (SCRIVENER et al., 2018).

Os concretos produzidos com essa combinação de argila calcinada e calcário apresentam propriedades mecânicas semelhantes e melhoria em alguns aspectos de durabilidade. A substituição do clínquer por argila e calcário nessas misturas reduz o custo e o impacto ambiental provocado (SCRIVENER et al., 2018).

2.10.2 Cimento LC³ - *Limestone Calcined Clay Cement*

O cimento LC³ (*Limestone calcined clay cement*), ou cimento de filler calcário e argila calcinada, é classificado como uma mistura ternária. Esse cimento começou a ser produzido, inicialmente de forma experimental e depois em larga escala, principalmente na Índia e em Cuba (SCRIVENER, 2014). Os bons resultados de suas propriedades físico-mecânicas no concreto chamaram a atenção da comunidade internacional, e pesquisas começaram a serem desenvolvidas com esse novo aglomerante.

Uma das principais vantagens desse tipo de cimento é a alta disponibilidade dos materiais cimentícios suplementares (MCS) utilizados, o que lhe proporciona um grande potencial para suprir a produção de cimentos com baixo impacto ambiental, em áreas onde outros MCS não estão disponíveis em quantidade (MALACARNE, 2019).

Essa composição de cimento LC³ aproveita-se de uma relação sinérgica entre a argila calcinada e o calcário, que permite a utilização de um alto nível de substituição do clínquer sem comprometimento das propriedades mecânicas (MALACARNE, 2019).

Esta mistura estabelece novas possibilidades para cimentos sustentáveis, reduzindo a escassez de outras adições minerais. Diante desses fatores favoráveis nos âmbitos econômico, técnico e sustentável, a utilização do LC³ tem sido considerada uma promissora medida mitigadora, que tem como objetivo principal a redução da relação clínquer/cimento, e conseqüentemente da emissão de CO₂ (DÍAZ et al., 2017a); (LINS, 2017).

Uma das premissas desse novo cimento encontra-se no âmbito ambiental, responsável por fomentar a busca por materiais suplementares que possam reduzir o teor de clínquer utilizado na fabricação do cimento Portland e, conseqüentemente, diminuir a emissão de CO₂ (LINS, 2017).

2.10.3 Benefícios do cimento LC³ no âmbito ambiental

O cimento LC³ desponta na atualidade como uma das mais promissoras opções de cimentos com baixo teor de emissão de carbono. O seu desempenho mecânico é tema de estudos para (WANG et al., 2021); (DU; PANG, 2020); (BARBALHO; SILVA; RÊGO, 2020); (MOREIRA; REGO, 2020); (DHANDAPANI et al., 2018), pesquisas que propõem estudar e analisar a porcentagem de substituição do clínquer e a relação entre as adições que propiciem melhorias no desempenho do concreto, e conseqüentemente uma maior aceitação para os MCS.

A eficiência do cimento LC³ neste quesito foi avaliada por Cancio Díaz et al. (2017), que analisaram a sustentabilidade do novo produto a partir da comparação do ciclo de vida de três cimentos produzidos em Cuba. Analisou-se um cimento Portland comum, um cimento pozolânico, e por fim, o LC³, fabricado a partir de 45% de substituição do clínquer por argila calcinada e filler calcário. Os resultados apontaram uma redução de cerca de 31% das emissões de CO₂ provenientes da fabricação do cimento LC³, em relação ao cimento Portland comum.

Já no Brasil, a pozolana utilizada em cimentos CPIII também apresenta uma redução dos impactos ambientais, demonstrando uma redução de 13% em relação ao cimento Portland comum (LINS, 2017).

Um das vantagens econômicas e ambientais do cimento LC³, em relação aos demais produzidos no Brasil, é decorrente do baixo teor de clínquer, além do menor consumo de combustível e eletricidade requerido para a calcinação da argila, sendo esse consideravelmente menor do que o necessário para a produção do clínquer (JOSEPH; BISHNOI, 2015).

3 METODOLOGIA ADAMC

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da Metodologia ADAMC (Avaliação do Desempenho Ambiental de Materiais Construtivos), com a finalidade de esclarecer e facilitar a compreensão do método. Assim, permite-se que os demais pesquisadores possam analisar e aplicar integralmente a metodologia ADAMC. A metodologia foi planejada com intuito de avaliar o desempenho ambiental de componentes construtivos, em especial artefatos de concreto; entretanto, admite-se que esta metodologia também pode ser implementada para avaliar processos ou fases do ciclo de vida de materiais e componentes construtivos.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia ADAMC consiste em avaliar o componente construtivo, tendo como premissa o pensamento do ciclo de vida (PCV), de maneira a compreender o todo de sua produção e identificar os pontos críticos com maior impacto ambiental, a fim de mensurar possíveis melhorias ambientais. Desta forma, a metodologia ADAMC identifica, direciona, avalia e apresenta melhorias ambientais, levando em consideração os indicadores de sustentabilidade preestabelecidos.

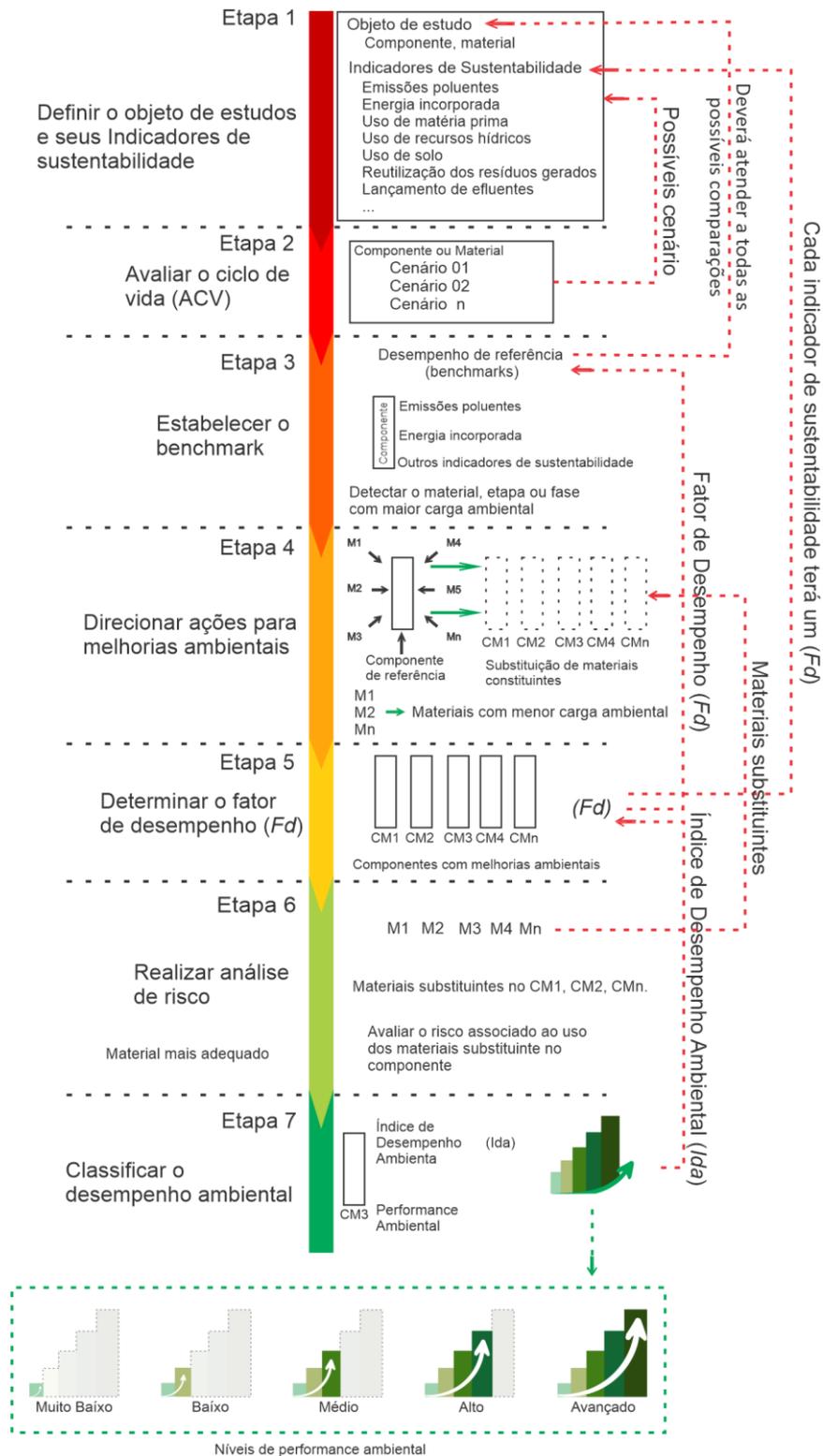
O uso de indicadores de sustentabilidade na escolha de materiais ou componentes para a construção civil ainda não possui destaque suficiente para representar uma tendência, e, somando-se a falta de motivação ou estímulo aos profissionais da construção civil, dificulta ainda mais esta prática. Essa problemática está relacionada ao desconhecimento dos indicadores de sustentabilidade, e da ausência de critérios preestabelecidos de desempenho ambiental.

Visando direcionar os indicadores de sustentabilidade para avaliação do desempenho ambiental dos materiais ou componentes da construção civil, são definidas categorias e critérios; estes apontam para uma atuação específica, ou seja, uma forma complementar e diretiva de se atingir as metas e os princípios propostos para a redução dos possíveis impactos ambientais relacionados à construção civil.

3.2 ESTRUTURA DA METODOLOGIA ADAMC

A estrutura da metodologia ADAMC é composta por 7 Etapas hierarquicamente dependentes entre si, conforme apresenta a Figura 28.

Figura 28 Estrutura da Metodologia ADAMC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A metodologia ADAMC identifica, direciona, avalia e apresenta melhorias ambientais no material construtivo, levando em consideração as possíveis substituições de tecnologias, processos ou materiais por outros que atendam a todas as especificações técnicas e apresentem menor carga ambiental, com objetivo de reduzir seu impacto ambiental, levando em conta indicadores de sustentabilidade preestabelecidos.

A metodologia ADAMC consiste em avaliar o quanto o componente construtivo pode vir a se tornar sustentável, conforme a redução de sua carga ambiental, direcionada aos seus indicadores de sustentabilidade preestabelecidos. A metodologia classifica a performance ambiental do material construtivo em cinco níveis de desempenho: muito baixo, baixo, médio, alto e avançado.

Toda estrutura metodológica da ADAMC foi projetada com base no pensamento do ciclo de vida (PCV), tendo como cerne a avaliação do ciclo de vida (ACV) e economia circular aplicada aos materiais e componentes construtivos e a facilidade de interpretação para o projetista.

As 7 etapas da Metodologia ADAMC foram estruturadas de forma sequencial e dependentes entre si; as etapas subsequentes necessitam de informações das etapas anteriores. A partir dos próximos tópicos, serão apresentados as etapas e requisitos a serem atendidos para a aplicabilidade da metodologia.

3.2.1 Etapa 1 - Definir o objeto de estudo e seus indicadores de sustentabilidade

Como dados de entrada para aplicação da metodologia ADAMC, é necessário definir o objeto de estudo e seus indicadores de sustentabilidade. Como componente construtivo podemos adotar o bloco de concreto, tijolos de concreto, telhas de concreto, placas de concreto, artefatos de concreto, concreto e outras peças de concreto.

Na construção civil, os indicadores de sustentabilidade podem ser definidos como emissões poluentes, energia incorporada, uso de matéria-prima, reutilização dos resíduos gerados, uso de recursos hídricos, lançamento de efluentes e uso do solo. Outros indicadores podem surgir, para ser analisados conforme a necessidade da avaliação ambiental do componente construtivo.

A seleção de indicadores de sustentabilidade é um processo que requer a definição de um foco que direcione aos fenômenos a observar, sendo possível limitar as variáveis de modo

a torná-las factíveis de serem medidas e avaliadas. Esse processo requer uma relação direta entre uma base conceitual definida e a finalidade a que se propõe (DALVI, 2014).

Os indicadores de sustentabilidade são relacionados as categorias de impacto como aquecimento global, escassez de recursos naturais, energia não renovável, resíduos gerados, saúde humana e outros que podem surgir, conforme a necessidade da avaliação ambiental do componente construtivo.

A finalidade para a qual a metodologia ADAMC é aplicada define o critério de escolha do objeto de estudo e seus indicadores de sustentabilidade ambiental, ou seja, qual a pretensão ambiental do estudo: redução da carga ambiental de um componente, redução de um impacto ambiental, redução de algum indicador de sustentabilidade ou avaliação de possíveis ganhos ambientais para um componente, por meio de sua performance ambiental.

Após a definição do objeto de estudo e seus indicadores de sustentabilidade, a metodologia ADAMC recomenda o avanço para a Etapa 2.

3.2.2 Etapa 2 - Avaliar o ciclo de vida

Esta etapa se baseia na avaliação do ciclo de vida (ACV) do componente construtivo selecionado, avaliando os indicadores de sustentabilidade preestabelecidos na Etapa 1, considerando todos os impactos ao longo do ciclo de vida do componente construtivo, abrangendo desde a extração dos materiais, produção, uso, descarte, reciclagem e reutilização. A Figura 29 demonstra um ciclo de vida de componentes construtivos.

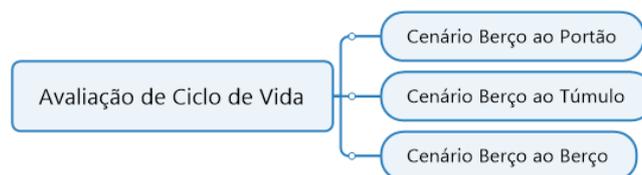
Figura 29 Ciclo de vida de componentes construtivos



Fonte: Elaborado pelo autor

O nível da pesquisa irá definir os cenários necessários para que se atinja o resultado esperado. Nesta etapa deverão ser disponibilizadas as informações precisas do componente construtivo para alimentar a ACV; a Figura 30 apresenta os cenários para a ACV do componente construtivo.

Figura 30 Cenários para avaliação do ciclo de vida



Fonte: Elaborado pelo autor

Os indicadores de sustentabilidade utilizados para avaliação da ACV e posterior avaliação do desempenho ambiental de componentes construtivos são preestabelecidos e relacionados às categorias e aos critérios a serem avaliados, direcionando para uma atuação específica, como uma redução dos possíveis impactos ambientais para as emissões poluentes, energia incorporada na construção civil e outros indicadores.

Os indicadores de sustentabilidade serão relacionados a categorias de impacto, como aquecimento global, escassez de recursos naturais, energia não renovável, resíduos gerados, saúde humana e outras quando necessário.

Após a realização da ACV e a quantificação da carga ambiental, direcionada a seus indicadores de sustentabilidade, avança-se para a Etapa 3.

3.2.3 Etapa 3 - Estabelecer o *benchmark*

Nesta parte da metodologia se obtém o perfil ambiental do componente construtivo, por meio das cargas ambientais que cada material constituinte corresponde no ciclo de vida do componente construtivo, informações coletadas da Etapa 2 - Avaliação do ciclo de vida.

O perfil ambiental do componente construtivo tem como propósito apresentar a carga ambiental do componente de uma forma mensurável, de fácil leitura e entendimento, para se estabelecer o *benchmark*.

Com base no perfil ambiental é estabelecido o desempenho de referência ou *benchmark*, com base nos indicadores de sustentabilidade. Define-se, assim, uma referência para o

desempenho ambiental do componente construtivo, permitindo a rápida comparação, avaliação, e identificação de potencial para melhorias ambientais.

O desempenho de referência *benchmark*¹ estabelece um sistema de medição, uma medida que permite aferir a performance global para futuras melhorias ambientais, de forma eficiente.

O *benchmark* deverá atender a todas as possíveis comparações, de forma direta e equivalente para os componentes, com objetivo de mensurar possíveis reduções de sua carga ambiental, para os indicadores de sustentabilidade preestabelecidos e avaliados.

Definimos o benchmark como o ato de comparar de forma eficiente a performance, neste caso o desempenho ambiental, comparando de maneira equivalente as cargas ambientais dos componentes construtivos.

Após estabelecer o desempenho de referência (*benchmark*) para uma comparação eficiente, direta e equivalente, avança-se para a Etapa 4.

3.2.4 Etapa 4 - Direcionar ações para melhorias ambientais

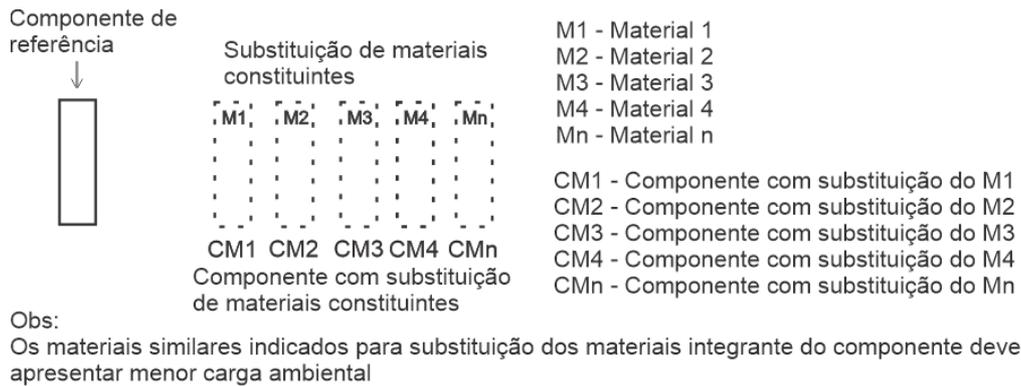
Esta etapa é responsável por identificar e direcionar possíveis melhorias ambientais no componente construtivo, estimulando soluções ambientais, levantando possibilidades e viabilizando melhorias, desenvolvendo novas propostas e identificando possíveis oportunidade ambientais.

As ações para melhorias ambientais têm a função de levantar ou identificar os materiais similares com menor carga ambiental para os indicadores de sustentabilidade avaliados, que possam substituir os materiais integrantes do componente construtivo, criando desta forma possibilidades de redução de seus impactos ambientais.

Esta etapa exige um conhecimento aprofundado dos materiais, processos e equipamentos utilizados na produção do componente construtivo avaliado, conhecimentos específicos para definir equivalência e similaridades para uma efetiva substituição parcial ou total. A Figura 31 apresenta a sequência para ações de melhorias ambientais.

¹ O *benchmark* é referenciado na literatura como marca de referência, ou seja, estabelece o desempenho de referência por intermédio do qual se estabelece uma relação ou comparação direta e equivalente.

Figura 31 Definição de seleção de estudo de melhorias ambientais



Fonte: Elaborado pelo autor

O critério para seleção e escolha dos materiais substituintes será sua baixa carga ambiental em comparação aos materiais para substituição. A substituição poderá ser total ou parcial conforme a necessidade do estudo.

Nesta etapa da metodologia são apresentados os possíveis materiais para substituição dos materiais integrantes do componente construtivo. A substituição dos materiais constituintes com alta carga ambiental visa uma substituição por outros materiais similares que atendam aos pré-requisitos técnicos preestabelecidos e que apresentem uma redução de sua carga ambiental.

Após levantar os materiais substituintes com menor carga ambiental, mas que apresentem equivalência e similaridades com os materiais constituintes, avança-se para a Etapa 5.

3.2.5 Etapa 5 - Determinar o fator de desempenho

Nesta etapa é determinado o fator de desempenho F_d do componente construtivo com substituição de seus materiais integrantes, apresentados na Etapa 4. O componente com substituição dos materiais M1, M2, M3, M4 e Mn, indicados como ações para melhorias ambientais no componente construtivo de referência, tem o objetivo de reduzir a sua carga ambiental.

O fator de desempenho F_d é uma comparação direta e equivalente para o indicador de sustentabilidade avaliado; é realizada uma comparação entre o componente de referência (*benchmark*) e o componente com substituição de seu material constituinte que apresente alta carga ambiental. O componente de referência (*benchmark*) é definido e apresentado na Etapa 3.

O objetivo do fator de desempenho é apresentar uma redução da carga ambiental relacionada ao indicador de sustentabilidade avaliado, para os componentes com substituição de seus materiais constituintes que apresentem alta carga ambiental.

Teremos um fator de desempenho para cada indicador de sustentabilidade avaliado, como as emissões poluentes F_{dCO_2} , energia incorporada F_{dEI} e outros indicadores de sustentabilidade quando avaliados. A Equação 3 e a Equação 4 demonstram o cálculo para determinar o fator de desempenho F_{dCO_2} das emissões poluentes CO₂ do componente com substituição do M1 e o fator de desempenho F_{dEI} da energia incorporada para esse mesmo caso.

$$F_{dCO_2} = \left(\frac{A_{CO_2} * 100}{B_{CO_2}} \right) \div 100 \quad \text{Equação 3}$$

F_{dCO_2} - Fator de desempenho das emissões para o componente CM1;

A_{CO_2} - Total de Emissões poluentes do componente com substituição do M1;

B_{CO_2} - Total de Emissões poluentes do componente de referência (benchmarks).

Para determinar o fator de desempenho para a energia incorporada F_{dEI} utiliza-se a Equação 4.

$$F_{dEI} = \left(\frac{A_{EI} * 100}{B_{EI}} \right) \div 100 \quad \text{Equação 4}$$

F_{dEI} - Fator de desempenho da energia incorporada para o componente CM1;

A_{EI} - Total de energia incorporada do componente com substituição do M1;

B_{EI} - Total de energia incorporada EI do componente de referência (benchmarks).

Determinado o fator de desempenho F_d para cada componente com substituição de seu material constituinte com alta carga ambiental, visando uma possível redução de seus impactos ambientais relacionados aos indicadores de sustentabilidade avaliados, avança-se para a Etapa 6.

3.2.6 Etapa 6 - Realizar análise de risco

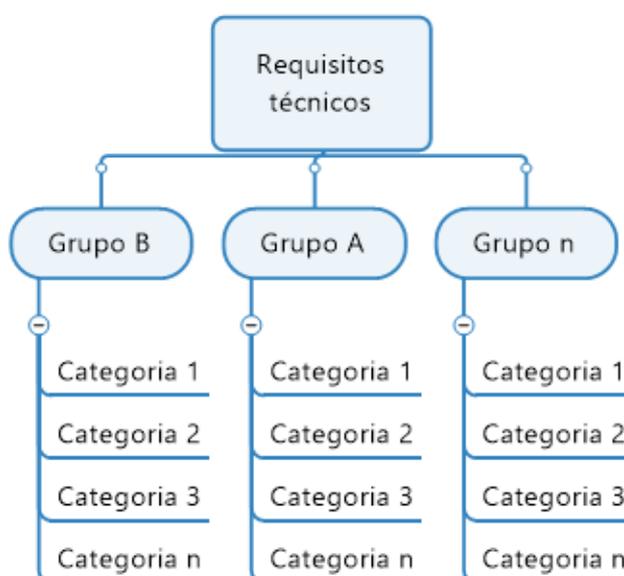
O objetivo da análise de risco é uma avaliação preventiva das possíveis ocorrências de falhas ou erros, que podem prejudicar a viabilidade do estudo para o componente com os materiais substituintes.

Nesta parte é realizada uma análise de risco para a utilização dos materiais substituintes proposto na Etapa 4. Utiliza-se uma análise *Swot* adaptada para a metodologia ADAMC, gerando informações para alimentar uma matriz de risco. Essa análise *Swot* consiste em coletar informações para a tomada de decisões, com o propósito de lidar com as incertezas relacionadas aos materiais levantados.

Para análise *Swot*, primeiramente deve ser criada uma Estrutura Analítica de Risco (EAR), uma ferramenta pela qual é possível agrupar os riscos e organizar seus grupos e categorias. Cada categoria é então dividida em níveis, sendo que cada nível define o risco a qual está sujeito.

A estrutura analítica de risco define os requisitos técnicos que os materiais substituintes devem atender para a produção do componente construtivo; a Figura 32 apresenta uma estrutura analítica de risco.

Figura 32 Estrutura Analítica de Risco



Fonte: Elaborado pelo autor

Os materiais substituintes devem atender aos pré-requisitos técnicos estabelecidos na EAR. A existência da possibilidade de não atendimento aos pré-requisitos técnicos pelo material substituinte será avaliada como risco, e será atribuído um risco a cada existência de possibilidade de falha ou não atendimento.

É a partir do processo de análise das possibilidades de falhas aos requisitos técnicos, atribuídos aos materiais substituintes na produção do componente, que será estruturada a matriz de risco.

Na análise *swot*, será analisada a existência de riscos e não sua probabilidade de ocorrer. Assim, identificam-se as possíveis ameaças e falhas que poderiam ocasionar um resultado negativo para o estudo. Os riscos atribuídos são informações e conhecimento fornecido pelos pesquisadores sob a luz dos materiais substituintes.

Utiliza-se a análise *Swot* adaptada para a metodologia ADAMC como ferramenta para a coleta de informações e identificação dos possíveis riscos aos materiais substituintes levantadas. A abordagem *swot* consiste em uma análise estratégica cuja abreviação significa forças, fraquezas, oportunidades e ameaças (do inglês *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*).

Nessa análise deve ser considerado que, invariavelmente, por mais que se invista no confronto de cada risco, não será possível prevenir a ocorrência de imprevistos durante a execução. Porém, estes serão sempre moldados à luz de uma concepção do que há de vir no produto em estudo, e limitados ao nível de informações disponíveis e ao alcance dos pesquisadores no momento.

É necessário considerar as incertezas de cada um dos riscos identificados, para que estes possam ser tratados de modo adequado, tomando o máximo cuidado para não induzir os resultados esperados. Os fatores quantitativos são decisórios na atribuição do risco associado para os materiais substituintes em análise.

O fornecimento e coleta destas informações são realizados pela equipe técnica que está desenvolvendo a pesquisa. Porém, estes serão sempre moldados à luz de uma concepção do que há de vir do componente em estudo, e limitados ao nível de informações disponíveis ao pesquisador no momento. A Tabela 16 apresenta um exemplo da estrutura de uma análise *swot*.

Tabela 16 Análise *swot* do material substituinte

	Grupo A			Grupo B		
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3
Material 1 substituinte	Risco 1	Risco 1	0 riscos	Risco 1	Risco 1	Risco 1
	Risco 2					Risco 2
	Risco 3	Risco 2			Risco 3	
Probabilidade de falhas	3	2	Inexistente	1	2	4

Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro passo para análise *swot* consiste em identificar os riscos associados a cada categoria. Para isso, é fundamental reconhecer e anotar qualquer tipo de falha ou não conformidade que pode afetar a produção do componente com o material substituinte. Nessa etapa, quanto mais riscos forem citados, mais vantagens a análise *swot* apresenta na identificação de possíveis falhas.

Os materiais levantados na Etapa 4 devem atender a pré-requisitos técnicos atribuídos aos materiais substituintes, sempre considerando sua influência no componente produzido com o material substituinte.

O nível de risco é uma somatória dos riscos associados a cada categoria, e será atribuído o grau de risco associado em inexistente, baixo, moderado, alto ou grave a cada material substituinte, conforme a quantidade de riscos levantados.

A quantidade de riscos atribuídos a cada categoria definirá de o grau de risco para a produção do componente com o material substituinte. A Tabela 17 apresenta o grau de risco associado a cada material substituinte avaliado.

Tabela 17 Grau de risco associado

0 Risco	Inexistente
1 a 5 Riscos	Baixo
6 a 10 Riscos	Moderado
11 a 15 Riscos	Alto
16 ou + Riscos	Grave

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os riscos mapeados pela análise *swot*, se proporcionará uma maior segurança no desenvolvimento do estudo para os componentes com os materiais substituintes. A matriz de risco consiste em uma ferramenta visual que permite avaliar o grau de ameaças,

incertezas e possibilidade de falha para a execução do componente com o material substituinte. Os materiais substituintes com menor grau de risco associado serão indicados para a Etapa 7. A Tabela 18 apresenta a estrutura da matriz de risco.

Tabela 18 Matriz de risco

Requisitos técnicos		Material substituinte 1	Material substituinte 2	Material substituinte 3
Grupo A	Categoria 1	1	Sem riscos	Sem riscos
	Categoria 2	2	3	Sem riscos
	Categoria 3	Sem riscos	1	1
Grupo B	Categoria 1	1	Sem riscos	Sem riscos
	Categoria 2	2	2	1
	Categoria 3	4	Sem riscos	1
Grau de risco associado		10	6	3
		Grave	Moderado	Baixo

Fonte: Elaborado pelo autor

A matriz de risco consiste em uma análise quantitativa. O grau de risco associado a cada material substituinte é uma somatória dos riscos atribuído a cada categoria avaliada, e sua pontuação é reflexo de possíveis falhas na produção do componente com o material substituinte.

A matriz de risco indicará o material substituinte com menor possibilidade de falha, e maior possibilidade de sucesso, para a produção do componente com melhorias ambientais. A probabilidade de falhas é definida pela quantidade de riscos, e o critério de escolha dos materiais substituintes será seu nível de risco associado ou quantidade de riscos.

Os materiais substituintes classificados com nível de risco associado em baixo e moderado serão indicados para a Etapa 7; os materiais classificados com nível de risco associados em grave serão descartados automaticamente devido à grande possibilidade de falhas para a atividade prática de produção do componente.

Os materiais classificados com nível de risco associado em alto só serão indicados para a Etapa 7 caso haja a possibilidade da implantação de mecanismos ou controle tecnológico

que elimine alguns riscos, e este material substituinte seja reenquadrado como baixo ou moderado.

Neste momento deverá ser realizada uma análise qualitativa dos possíveis riscos de forma a controlá-los ou até mesmo eliminá-los. Caso não haja a possibilidade do reenquadramento nos níveis de risco associados em baixo ou moderado, os materiais serão descartados e será retomada a Etapa 4 para busca de novos materiais substituintes, caso não haja materiais que possam ser indicados para a Etapa 7.

Após a classificação dos materiais substituintes nos graus de risco associados em baixo ou moderado, avança-se para a Etapa 7.

3.2.7 Etapa 7 - Classificar o de desempenho ambiental

Esta etapa é responsável por apresentar a performance ambiental do componente construtivo com o material substituinte, um produto mais sustentável em comparação ao produto inicial do estudo, para os indicadores de sustentabilidade ambiental avaliados.

Como resultado da performance ambiental temos o índice de desempenho ambiental (*Ida*) e o nível de performance ambiental (*n_{pa}*) para os indicadores de sustentabilidade avaliados. O *Ida* nada mais é que uma média ponderada da redução dos impactos ambientais relacionado os indicadores de sustentabilidade avaliados; o *Ida* é dado em porcentagem de redução. Para encontrar o índice de desempenho ambiental, *Ida*, utiliza-se a Equação 5.

$$Ida = \left\{ \left(\frac{\sum F_d}{n_{F_d}} \right) - 1 \right\} * 100 \quad \text{Equação 5}$$

Ida - índice de desempenho ambiental do componente com melhorias ambientais;

$\sum F_d$ - Somatória dos fatores de desempenho (Indicadores de sustentabilidade);

n_{F_d} - Quantidade de indicadores de sustentabilidade avaliados.

A metodologia ADAMC adota uma análise de equivalência. O *Ida* representa uma redução dos impactos ambientais: quanto maior o *Ida*, mais sustentável será a proposta. Baseado nesse conceito foi desenvolvida uma representação gráfica para a performance ambiental adotada pela ADAMC, como demonstra a Figura 33.

Figura 33 Performance Ambiental

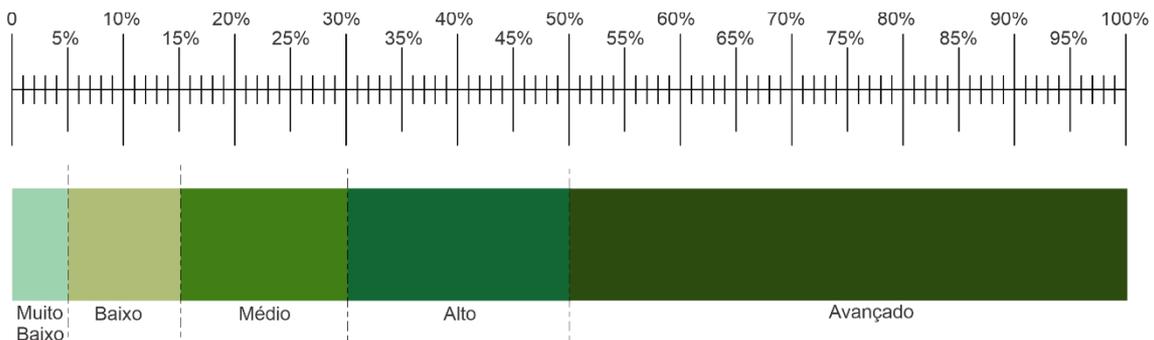


Fonte: Elaborado pelo autor

A representação gráfica adotada pela Metodologia ADAMC para figurar como símbolo da performance ambiental para materiais construtivos Figura 33 traz uma simbologia em suas barras escalonas com cores em tonalidade de verde e uma seta da esquerda para a direita em sentido crescente. As barras trazem o significado do potencial aumento da performance ambiental; já a seta expressa o entendimento que a referência de desempenho ambiental está sempre em constante evolução e aprimoramento.

Com o índice de desempenho ambiental, *Ida*, é possível determinar os níveis da performance ambiental para o componente com melhorias ambientais. A Figura 34 apresenta uma escala para determinar o nível da performance ambiental que varia de 0% a 100%, conforme a escala proposta pela Metodologia ADAMC.

Figura 34 Escala do índice de desempenho ambiental para a determinação do nível de performance ambiental



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A escala do índice de desempenho ambiental desenvolvida pela metodologia ADAMC é resultado de uma análise minuciosa sobre as metodologias de desempenho do ambiente construído, somada a uma detalhada análise de sensibilidade do desempenho do componente e dos materiais avaliados, que permitiu desenvolver intervalos para a performance ambiental, estabelecendo cinco níveis de performance.

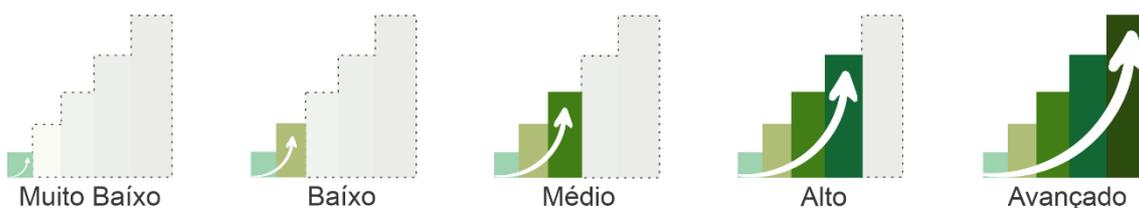
Tabela 19 Níveis de performance ambiental proposto pela Metodologia ADAMC

Níveis de performance ambiental	
$\leq 5\%$	Muito Baixo
$> 5\% \text{ e } \leq 15\%$	Baixo
$> 15\% \text{ e } \leq 30\%$	Médio
$> 30\% \text{ e } \leq 50\%$	Alto
$> 50\%$	Avançado

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base na escala do índice de desempenho ambiental, podemos classificar o nível da performance ambiental em cinco categorias como: muito baixa, baixa, média, alta e avançada. A Metodologia ADAMC adota uma representação gráfica associada também a uma escala de cores, com colunas ou barras de ordem crescente, desenvolvida para representar o nível de desempenho ambiental, como demonstra a Figura 35.

Figura 35 Níveis de performance ambiental proposto pela Metodologia ADAMC

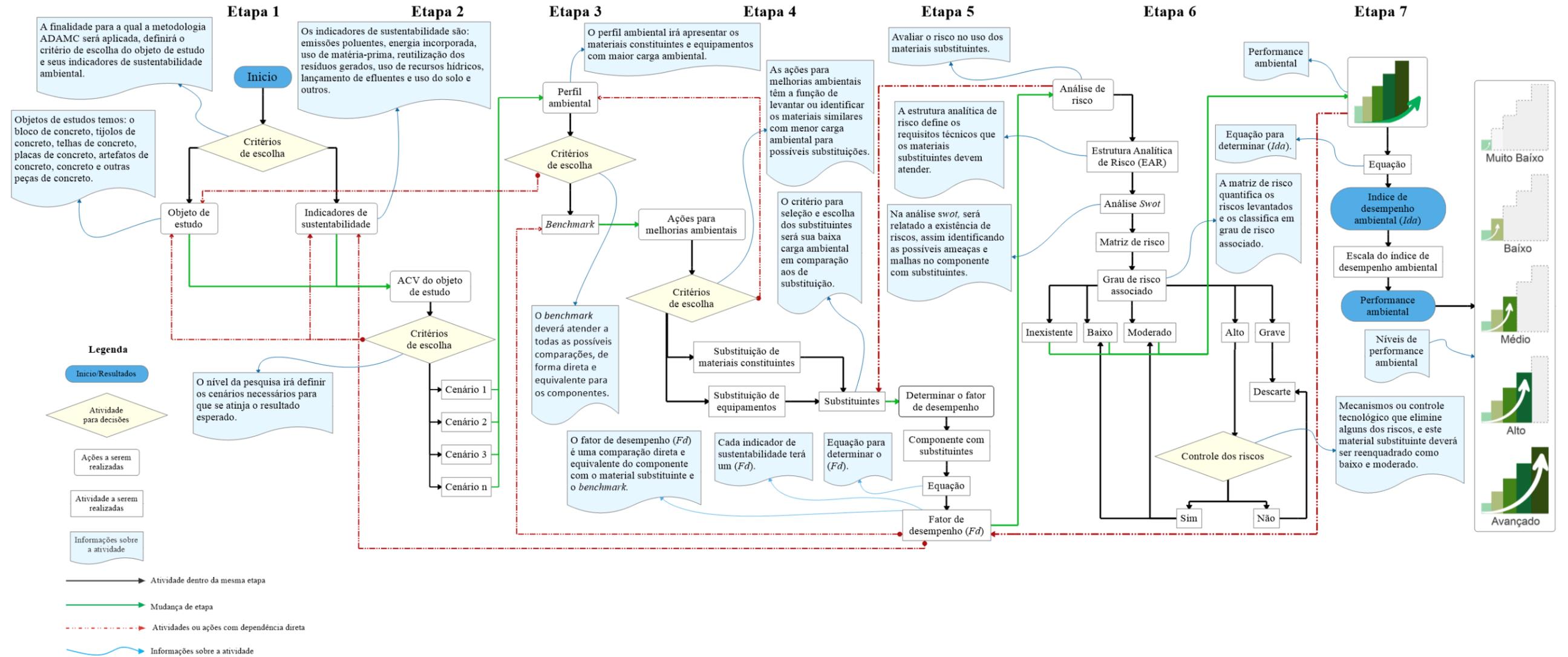


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Esse conceito de representação gráfica desenvolvida pela metodologia ADAMC permite o rápido entendimento dos resultados, bem como o estabelecimento de uma identidade visual, associada também a uma escala de cores e um número crescente de barras, representando gradativamente o aumento da performance ambiental, para que desta maneira os resultados sejam expressos de forma intuitiva e compreensível. A Figura 36 demonstra o fluxograma detalhado da metodologia ADAMC para cada etapa de maneira simples e compreensível.

A Figura 36 demonstra o fluxograma adotado para a metodologia ADAMC.

Figura 36 Fluxograma da Metodologia ADAMC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

3.3 COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA ADAMC EM RELAÇÃO AS METODOLOGIAS E FERRAMENTAS ANALISADAS

A metodologia ADAMC em comparação com as metodologias e ferramentas analisadas se assemelham pelo fato de utilizarem o conceito da ACV e do *benchmark*. Em sua maioria foram pensadas para avaliar o desempenho de edificações ou partes dela, mas apenas a metodologia ISMAS e a ferramenta SICAD foram pensadas para avaliar o desempenho de materiais construtivos.

As metodologias e ferramentas analisadas são voltadas para avaliação da sustentabilidade de edificações e construções, e embora todas tenham esse objetivo em comum, cada uma delas apresentam suas particularidades e áreas de foco distintas. Aqui estão algumas comparações breves entre elas:

- BREEAM avalia categorias como: energia, água, resíduos, saúde e bem-estar, transporte, uso do solo e ecologia.
- BEPAC avalia o desempenho ambiental de edifícios em todas as etapas do ciclo de vida, desde o projeto até a demolição. Os critérios avaliados incluem energia, água, resíduos, materiais, conforto ambiental e qualidade do ar.
- LEED avalia o projeto, construção, operação e manutenção de edifícios sustentáveis em diferentes categorias como: energia, água, materiais, qualidade do ambiente interno e inovação.
- SBTool avalia o edifício em diversas categorias como: energia, água, materiais, saúde e bem-estar, e aspectos socioeconômicos e culturais.
- NABERS avalia o desempenho ambiental de edifícios comerciais, como escritórios e shoppings, com foco em energia, água, resíduos e qualidade do ambiente interno.
- CASBEE avalia o desempenho ambiental de edifícios em diversas categorias, como energia, materiais, qualidade do ambiente interno, paisagem ecológica, e aspectos socioeconômicos.

- DGNG avalia o desempenho ambiental de edifícios em diferentes fases do ciclo de vida, desde a construção até a desmontagem, em categorias como energia, água, materiais, qualidade do ambiente interno e inovação.
- AQUA avalia o desempenho ambiental de edifícios em diferentes categorias, como energia, água, materiais, qualidade do ambiente interno e conforto.
- ASUS avalia o desempenho ambiental de edifícios em diferentes categorias, como energia, água, materiais, qualidade do ambiente interno e inovação.
- Norma Europeia EN 15804, estabelece os critérios para avaliação do ciclo de vida de produtos de construção, incluindo aspectos ambientais.
- ISMAS é formada por uma estrutura que ajuda as empresas a selecionarem materiais mais sustentáveis para seus empreendimentos, levando em consideração os impactos ambientais e sociais ao longo do ciclo de vida do produto. O ISMAS considera tanto o desempenho técnico quanto a sustentabilidade na tomada de decisão de compra de materiais.
- SIDAC é composto em sua primeira versão por uma base de dados que contém informações sobre materiais de construção, sendo mensurados dois indicadores de sustentabilidade, como energia primária e emissão de CO₂, para o cenário do berço ao portão da fábrica.

A metodologia ADAMC se diferencia das demais por sua estrutura ser pensada para avaliar artefatos de concreto, e poder avaliar qualquer indicador de sustentabilidade desejado para a construção civil. Um dos pontos em destaque é que seu *benchmark* é definido dentro da própria metodologia de forma direta e equivalente para definir fatores de desempenho (fd). Também define um índice de desempenho ambiental (ida) mensurado em porcentagem de redução dos impactos ambientais alçados. Outro ponto é o nível de desempenho ambiental para o material avaliado, podendo ser classificado em cinco níveis como: muito baixo, baixo, médio, alto e avançado.

Outro fato em destaque é a escala gráfica para o rápido entendimento dos resultados, bem como o estabelecimento de uma identidade visual que permite representar gradativamente o aumento da performance ambiental do material avaliado.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ADAMC AO BLOCO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

Para a aplicabilidade da metodologia ADAMC é necessário definir alguns termos para o objeto de estudo, o bloco de pavimento intertravado de concreto, que aqui será tratado como um componente construtivo.

A NBR 15775 (NBR, 2013) define o componente como uma unidade integrante de determinado sistema da edificação, com forma definida e destinada a atender funções específicas (por exemplo, bloco de alvenaria, telha, folha de porta).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e a ABNT NBR 9781:2013, o bloco de pavimento intertravado de concreto é um sistema composto por peças de concreto, assentadas sobre camada de areia e travadas entre si por contenção lateral (ABCP, 2010). Porém, neste estudo será avaliado apenas o desempenho ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto, não será considerada no estudo a camada de areia.

O uso da metodologia ADAMC tem o objetivo de identificar, propor e avaliar oportunidades de melhorias ambientais no bloco de pavimento intertravado de concreto, visando uma redução efetiva de sua carga ambiental.

A seguir é detalhado o processo de aplicação da metodologia para avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos, aplicada ao bloco de pavimento intertravado de concreto.

4.1 ETAPA 1 - DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO E SEUS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

A escolha do bloco de pavimento intertravado de concreto se deu pela sua representatividade histórica, e também se observa uma evolução tecnologia deste material construtivo desde os primeiros relatos de sua utilização. Foi utilizado na Mesopotâmia, e posteriormente pelos Romanos em suas ruas e estradas. Atualmente é classificado como um material versátil, econômico, e ecologicamente correto. Relacionado à percolação da água no solo, diminui os riscos de enchentes e contribui com a recomposição das reservas subterrâneas de água, quando comparado com outros tipos de pavimento.

Podemos observar uma evolução tecnológica desde seus primeiros registros, utilizado para pavimentação de estradas e ruas feitas de pedras cuidadosamente unidas, em que todas as fendas eram preenchidas com pedras menores manualmente, depois por pedras talhadas a mão, e atualmente este componente é fabricado por máquinas elétricas em grande escala. ou moldado em formas plásticas.

O objeto de estudo será o bloco de pavimento intertravado de concreto master 6,0 cm x 11,0 cm x 21,6 cm produzido em fábrica de pré-moldado localizada em Brasília - DF. O estudo utilizará o termo bloco de pavimento intertravado de concreto como um componente, definido como uma peça de concreto. A Figura 37 apresenta o componente escolhido.

Figura 37 Bloco de pavimento intertravado de concreto

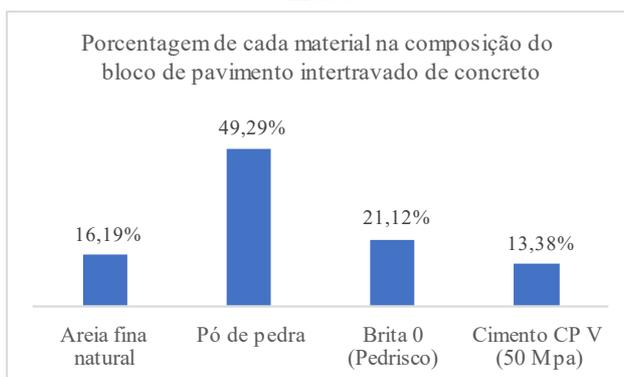


Fonte: Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público (ABCP, 2010, página 11)

Tendo em vista os impactos ambientais associados à produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, seu princípio consiste em definir os indicadores de sustentabilidade ambiental a serem avaliados pela metodologia ADAMC.

As matérias-primas integrantes para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto são areia fina, pó de pedra, pedrisco e cimento. A Figura 38 demonstra a porcentagem de cada material presente na composição bloco de pavimento master 6,0 cm x 11,0 cm x 21,6 cm.

Figura 38 Porcentagem de cada material na composição bloco de pavimento intertravado de concreto em massa



Fonte: Elaborado pelo autor

Os aspectos ambientais do bloco de pavimento intertravado de concreto são diretamente relacionados a uma produção industrial, através de máquina vibro prensa, e têm como resultado uma taxa expressiva de emissões CO₂ e consumo de energia na sua produção, desde a extração das matérias primas, produção, descarte ou reciclagem dos blocos, que estão diretamente relacionadas aos diversos impactos ambientais. A Tabela 20 apresenta os indicadores de sustentabilidade, categorias e critérios avaliados pelo estudo.

Tabela 20 Indicadores de sustentabilidade

Critérios	Indicadores de sustentabilidade	Categoria de impacto
Total de emissões de dióxido de carbono CO ₂	Emissões CO ₂	Aquecimento global
Total de energia incorporada	Energia Incorporada	

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 20 traz os critérios avaliados e relacionados aos indicadores de sustentabilidade (emissões CO₂ e energia incorporada), que orientam a categoria de impacto (aquecimento global). Nesta etapa é realizado o planejamento da avaliação do desempenho ambiental, seleção de indicadores para avaliação de desempenho ambiental.

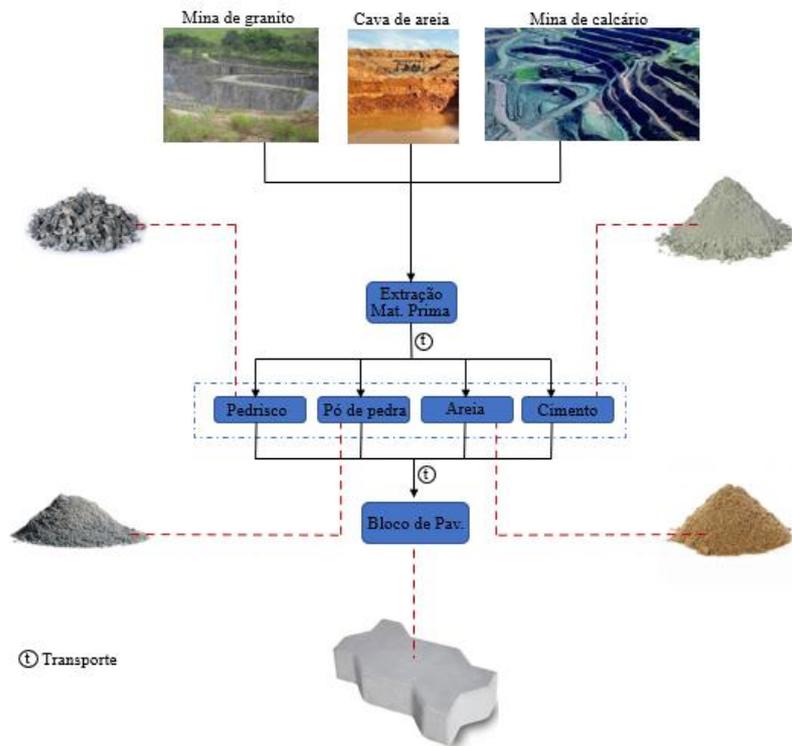
4.2 ETAPA 2 - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO BLOCO DE PAVIMENTO

Nesta etapa é realizada a avaliação do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto (ACV_b), tendo em vista os critérios avaliados, indicadores de sustentabilidade e sua categoria de impacto ambiental associado a seu ciclo de vida.

Seu princípio consiste em analisar os aspectos ambientais do bloco de pavimento intertravado de concreto, por meio de um inventário de entradas e saídas elementares, considerando as etapas, fases, processos e materiais, como: extração das matérias-primas para a produção da areia fina, pó de pedra, pedrisco e cimento; transporte em todas as etapas; fabricação; reciclagem do bloco de pavimento; e destinação final.

A Figura 39 apresenta as etapas e materiais integrantes do bloco de pavimento intertravado de concreto em estudo.

Figura 39 Materiais integrantes do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor

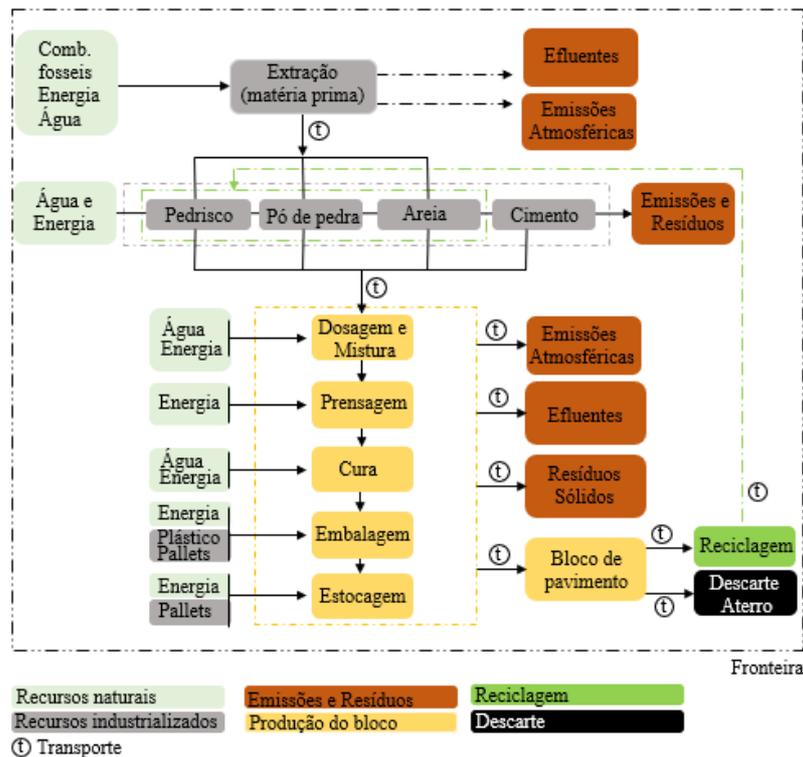
4.2.1 Avaliação do ciclo de vida do bloco de pavimento

A avaliação de ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto tem como premissa as referidas normas ABNT NBR ISO 14040:2014 e ABNT NBR ISO 14044:2014, que fornecem um conjunto de diretrizes para estudos de uma avaliação de ciclo de vida.

4.2.1.1 Escopo e unidade funcional

O propósito da ACVb é quantificar as cargas ambientais que cada etapa, fase ou componente representa no ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto, como: extração das matérias-primas, pedrisco, pó de pedra, areia fina, cimento; produção do bloco de pavimento; reciclagem do bloco de pavimento; e descarte em aterro de resíduos da construção civil. Esses componentes e processos relacionam-se a diversos impactos ambientais que são originados pelas emissões CO₂ e energia incorporada aos materiais e processos. A Figura 40 apresenta o escopo do estudo da avaliação do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto (ACVb).

Figura 40 Escopo do estudo da ACVb



- Para o estudo, adotamos unidade funcional de (m²) de produção do bloco de pavimento intertravado de concreto.
- O estudo foi realizado na cidade de Brasília; a extração e beneficiamento dos materiais (pó de pedra, pedrisco e areia fina) foi realizada por uma mineradora em Padre Bernardo-GO e Samambaia-DF. Em seguida, os materiais foram transportados para a fábrica de pré-moldados no Guará, Brasília-DF, para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto. Os dados referentes à extração e ao beneficiamento do cimento e reciclagem do bloco de pavimento intertravado de concreto foram coletados na literatura nacional, no que tange a emissões de CO₂ e energia incorporada EI da sua produção. Já para os dados do descarte do bloco de pavimento intertravado de concreto, consideraram-se a destinação no aterro de resíduos da construção civil e o maquinário utilizado no aterro.

A coleta de dados abrangerá uma pesquisa da literatura nacional e internacional sobre avaliação de ciclo de vida na construção civil nos últimos 10 anos, e coleta das informações de inventário de ciclo de vida (ICV), disponível pela literatura nacional para avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV) de materiais de construção civil.

Para o estudo da ACVb foram projetados três cenários: cenário A, cenário B e cenário C.

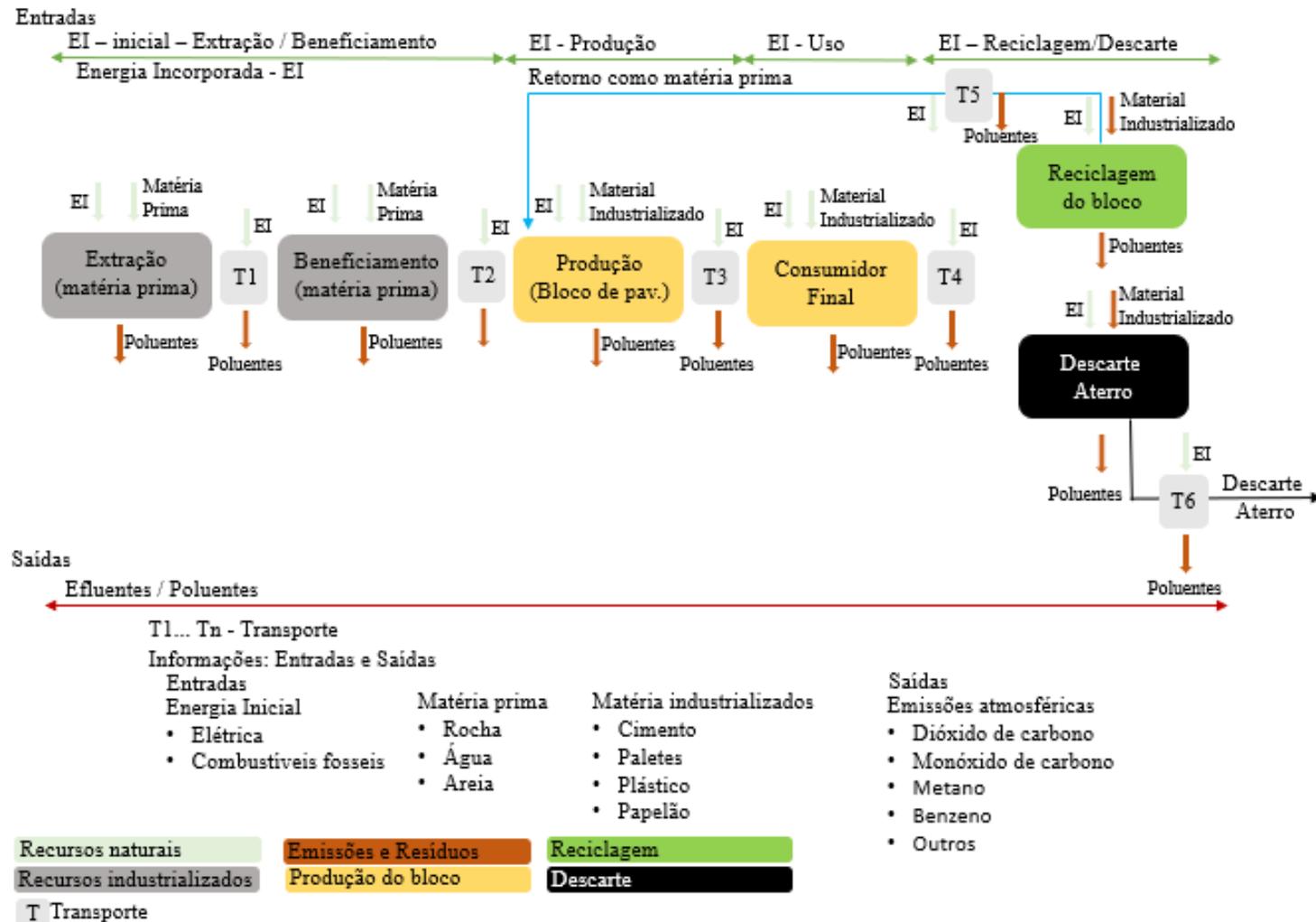
- Cenário A, do berço ao portão, considera o ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto desde a extração de matéria-prima até a porta da fábrica.
- Cenário B, do berço ao túmulo, considera a ideia de que a vida útil do bloco de pavimento intertravado de concreto chega ao fim, uma expressão usada para descrever o processo linear de extração, produção, uso e descarte.
- Cenário C, do berço ao berço, considera o ciclo mais completo em uma ACV, partindo do princípio de que o material pode ser reciclado, sendo matéria prima para outros produtos e mantendo uma economia circular ativa.

4.2.1.2 Inventário do ciclo de vida do bloco de pavimento

A coleta de dados propriamente dita foi realizada por meio de visitas técnicas junto à fábrica de pré-moldados no Guará - DF, na qual foram aplicadas entrevistas com funcionários e questionário elaborado com intuito de coletar informações sobre a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, considerando todas as entradas e saídas de materiais.

Os dados para o inventário provieram de fontes primárias, coletados por meio de entrevistas e preenchimento de formulários. Foi utilizada a norma ABNT NBR ISO 14044:2014, que estabelece a gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. A Figura 41 apresenta o sistema em estudo, apresentando as entradas e saídas dos sistemas elementares ao longo do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto, entradas das matérias-primas e saídas de resíduos e emissões CO₂.

Figura 41 Ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor

(1) Cálculo das emissões de CO₂ e energia incorporada EI

A forma de mensurar os impactos que a construção civil pode vir a provocar sobre o meio ambiente é estabelecida pela quantidade de emissões CO₂, e em especial o dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI aos materiais ou no produto final; essas quantidades de emissão de CO₂ e energia EI estão diretamente relacionadas aos diversos impactos ambientais.

Para a conversão da energia elétrica em emissões de CO₂, foram utilizados os dados publicados no Balanço Energético Nacional (BEN, 2020); Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014) e, para o Diesel, dados do relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019); (CALDAS; SPOSTO, 2017); (SILVA, 2013), em que:

Tabela 21 Conversão da energia elétrica, Diesel em MJ e emissões CO₂

	Energia	Megajoules	Emissões CO ₂
Eletricidade	1 kWh	0,6 MJ	0,06 kgCO ₂
1 litro de Diesel		37,30 MJ	2,63 kgCO ₂

Fonte: (BEN, 2020)

Para o cálculo das emissões de CO₂ e energia incorporada EI, seguiram-se Equação 3 e Equação 4 adaptadas de Albuquerque, Lira e Sposto (2018), considerando distância em km, o valor médio do consumo do Diesel em km/L, kgCO₂/LDiesel e capacidade de transporte.

(2) Transportes T1, T2, T3, T4, T5 e T6

O transporte está presente em todas as fases do produto, compreendendo uma parcela significativa dos impactos ambientais pelas emissões de CO₂ e energia incorporada EI em todas as fases da produção do bloco de pavimento intertravado de concreto (extração, beneficiamento, produção, uso, reciclagem e descarte).

Optou-se por agrupar todas as informações em único tópico referente aos transportes/ distância percorrida pelos materiais, para uma melhor compreensão e interpretação dos dados para o transporte dos agregados.

O tempo necessário para o carregamento do caminhão, consumo de combustível da máquina por intervalo de tempo e a capacidade de carga do caminhão foram os fatores considerados para estimativa do consumo de combustível para transporte até o beneficiamento, produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, consumidor, reciclagem e disposição final. Para o transporte foram levantados o consumo médio dos principais caminhões transportadores utilizados e as distâncias médias percorridas pelo material.

- Transporte T1:
 - Rocha que dá origem ao pó de pedra e ao pedrisco: material da jazida ao beneficiamento; há a utilização de escavadeiras, consumindo 11,03 L/h de Diesel, que transferem o material para caminhões, consumindo 6,8 km/L. Os caminhões percorrem cerca de 5 km até o beneficiamento, realizado pela Sarkis Mineração, Padre Bernardo - GO.
 - Areia de lavra em leito de rio por dragagem: o material é transportado da draga para beneficiamento e classificação do material em granulometria adequada; há a utilização de pá carregadeira, consumindo 10,1 L/h de Diesel, que transferem o material para caminhões, consumindo 10 km/L. As pás carregadeiras percorrem cerca de 0,5 km até o beneficiamento realizado pela Mineração Nossa Senhora Aparecida, Samambaia-DF.
- Transporte T2:
 - Após o armazenamento temporário, o pedrisco e pó de pedra são transportados por meio de pás carregadeiras que consomem 10,1 L/h de Diesel aos caminhões que levarão o produto ao consumidor final, consumindo 1,18 km/L e percorrendo cerca de 1 km.
- Transporte T2.1:
 - O transporte do pedrisco e pó de pedra aos centros de produção do bloco de pavimento utiliza um caminhão com capacidade de 12 m³ ou 14 a 15 toneladas, fazendo 3,4 km/L, utilizando Diesel. Para o presente estudo, adotou-se a distância média de 76 km.

- O transporte da areia aos centros de produção do bloco de pavimento utiliza um caminhão com capacidade de 12 m³ ou 14 a 15 toneladas, fazendo 3,4 km/L, utilizando Diesel. Para o presente estudo, adotou-se a distância média de 34 km.
- Transporte T3:
 - O transporte aos centros consumidores é terceirizado, portanto há uma grande variedade de tipos de caminhões que o realizam. Para simplificar o estudo, convencionou-se a utilização de um caminhão de médio porte fazendo 5,8 km/L, utilizando Diesel, com capacidade de 12 toneladas. Para o presente estudo, adotou-se a distância média de 30 km.
- Transporte T4:
 - O presente estudo adotou o tempo de 50 anos de vida útil, como preconiza a NBR 15575-3 (ABNT, 2013), após a introdução do bloco de pavimento intertravado de concreto em calçadas e vias como pavimentação em empreendimentos habitacionais, como um edifício em sua totalidade configurando seu uso. Esta etapa não se relaciona a emissões ou energia incorporada, mas apenas ao transporte do material demolido para a reciclagem ou a destinação final em aterro de resíduos da construção civil. Para o presente estudo, adotou-se a distância média de 30 km.
- Transporte T5:
 - O transporte para a reciclagem, a produção do agregado reciclado ARC, é realizado no próprio canteiro da fábrica de pré-moldados Original Blocos. O agregado reciclado é realizado com os blocos de pavimentos e blocos de vedação que por algum motivo não puderam ser comercializados por algum defeito na fabricação, transportado por meio de pás carregadeiras que consomem 10,1 L/h de Diesel aos caminhões que levarão o produto ao consumidor final, consumindo 1,18 km/L percorrendo cerca de 1 km.
- Transporte T6:

- Nesta possível hipótese, para execução do objetivo proposto será encaminhado o agregado reciclado para o aterro de resíduos da construção civil percorrendo uma distância de 51 km, distância entre a fábrica de pré-moldados ao aterro de resíduos da construção civil. A disposição do material no aterro é realizada por máquina pesada, com utilização de escavadeiras, consumindo 9,07 L/h de Diesel, movimentando e espalhando o material pelo aterro de resíduos da construção civil, consumindo 1,18 km/L. As máquinas percorrem, em média, 15 km/dia.

Optou-se por utilizar os dados do Ministério do Meio Ambiente (MINISTÉRIO, 2014), por ser tratar de um inventário realizado para o Brasil e específico para o setor de transportes, a partir dos quais se determinam os valores médios de quilometragem por litro para veículos do ciclo Diesel: o consumo específico de Diesel (LDiesel/100km) para caminhões pesados de 29,0 LDiesel/100km, quilometragem por litro de Diesel (km/LDiesel) para caminhões pesados de 3,4 km/LDiesel.

Na Tabela 21 são apresentados os dados utilizados para o cálculo das emissões de CO₂ e energia incorporada EI devido ao uso do Diesel no transporte dos materiais em estudo. A Tabela 22 apresenta as cargas ambientais relacionadas ao transporte em todas as fases da produção do bloco de pavimento intertravado de concreto.

Tabela 22 Transportes T1 a T6 - distância - Emissão kgCO₂/L e MJ/L

Transporte	Material	km	Máquinas Pesados (km/L)	Energia (MJ/L)	Emissão (kg CO ₂ /L)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Extração da matéria prima							
<i>Transporte T1</i>	Pedrisco	5	6,80	37,30	2,60	2,29	0,16
	Pó de pedra	5	6,80	37,30	2,60	2,29	0,16
	Areia fina	0,5	1,18	37,30	2,60	1,32	0,09
Produção do bloco							
<i>Transporte T2</i>	Pedrisco	0,5	1,18	37,30	2,60	2,63	0,18
	Pó de pedra	0,5	1,18	37,30	2,60	2,63	0,18
	Areia fina	0,5	1,18	37,30	2,60	2,63	0,18
<i>Transporte T2.1</i>	Pedrisco	76	3,40	37,30	2,60	39,49	2,76
	Pó de pedra	76	3,40	37,30	2,60	39,49	2,76
	Areia fina	34	3,40	37,30	2,60	39,49	2,76
Centros consumidores							
<i>Transporte T3</i>	Bloco de Pav. intertravado	30	5,80	37,30	2,60	16,08	1,12

Demolição							
<i>Transporte T4</i>	Bloco de Pav. intertravado	30	5,80	37,30	2,60	12,86	0,90
Reciclagem							
<i>Transporte T5</i>	Entulho	1	1,18	37,30	2,60	2,63	0,18
Destinação final							
<i>Transporte T6</i>	Entulho	51	6,80	37,30	2,60	23,31	1,63
<i>Transporte T6.1</i>	Entulho	1	1,18	37,30	2,60	1,05	0,07
Total de Energia (MJ) e Total de Emissões (kgCO ₂)						187,16	13,06

Fonte: Elaborado pelo autor

(3) Extração da matéria prima

A extração da rocha é realizada em mina a céu aberto por meio do desmonte por explosivos. Na etapa de extração da rocha há a utilização de uma perfuratriz que consome aproximadamente 1,5 L/h de Diesel para a colocação de 700 g de explosivos para a extração de cerca de 1 m³ de brita, apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 Quantidade de emissão kgCO₂ e MJ para a extração do pedrisco e pó de pedra

Extração	UF	Perfuratriz (LDiesel/h)	Energia (MJ/L)	Fator de Emissão (kg CO ₂ /L)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Pedrisco	m ³	1,50	37,300	2,60	55,95	3,90
Pó de pedra	m ³	1,50	37,3	2,60	55,95	3,90

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a extração da areia natural extraída por draga no leito do rio, a areia foi conduzida por meio da operação de lavra do tipo de dragagem hidráulica em leitos submersos. A draga utilizada tem capacidade de produção média de 300 m³/h e consumo de combustível de 250 L/d.

Tabela 24 Quantidade de emissão kgCO₂ e MJ para a extração da areia lavada

Extração	UF	Draga (LDiesel/h)	Energia (MJ/L)	Fator de Emissão (kg CO ₂ /L)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Areia	m ³	10,40	37,30	2,60	129,31	9,02

Fonte: Elaborado pelo autor

(4) Beneficiamento da matéria prima

A etapa de beneficiamento corresponde à adequação granulométrica da rocha às faixas comerciais desejadas. Para isso há vários processos de peneiramento e fragmentação da rocha, também conhecida por britagem. No presente estudo, todos os equipamentos são movidos a energia elétrica.

Após ser transportada pelos caminhões, a brita passa ao processo de beneficiamento, que se inicia no alimentador, passando ao britador de mandíbula; a pedra passa por sucessivos estágios de fragmentação, peneiramento e transporte por correias, até que se atinja a granulometria comercializada.

Foi quantificado todo o consumo em kWh de energia nessa etapa, considerando os dados da usina de britagem estudada e suas correções quanto à unidade funcional adotada. Foi contabilizado o consumo em kWh para produção de 1 m³ de brita, como apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 Quantidade de energia incorporada no beneficiamento da rocha (m³)

Beneficiamento da brita	Energia (kWh)	UF
Energia elétrica	10,80	m ³

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia não é considerada um impacto ambiental, mas sua produção está fortemente relacionada a impactos ambientais importantes, e representa um elevado custo na produção de mercadorias. Por esse motivo, invariavelmente, o consumo é medido e contabilizado no ICV.

Para a conversão da energia elétrica da produção do agregado natural em energia incorporada EI e emissões de CO₂ foram utilizados os dados de (SACHO et al., 2016); (SILVA, 2013), conforme apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 Quantidade de emissão de CO₂ e energia incorporada EI na produção de energia elétrica para produção do agregado natural (m³)

Beneficiamento da brita	UF	kWh	Energia (MJ/kWh)	Fator de Emissão (kgCO ₂ /kWh)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Pedrisco	m ³	10,80	6,00	0,06	64,80	0,65
Pó de pedra	m ³	10,80	6,00	0,06	64,80	0,65

Fonte: Elaborado pelo autor

Na etapa de armazenagem do agregado, a brita é armazenada temporariamente em pilhas a céu aberto e não há utilização de combustível ou energia.

(5) Produção do bloco de pavimento intertravado de concreto

Vale salientar que, para se obter o fluxo de referência, realizou-se a substituição considerando todas as entradas e saídas para produção do bloco de pavimento intertravado de concreto no ICV.

Pedrisco (Brita 0): a densidade aparente do pedrisco foi fornecida pela indústria de pré-moldados, adotando-se o valor de 1,70 t/m³.

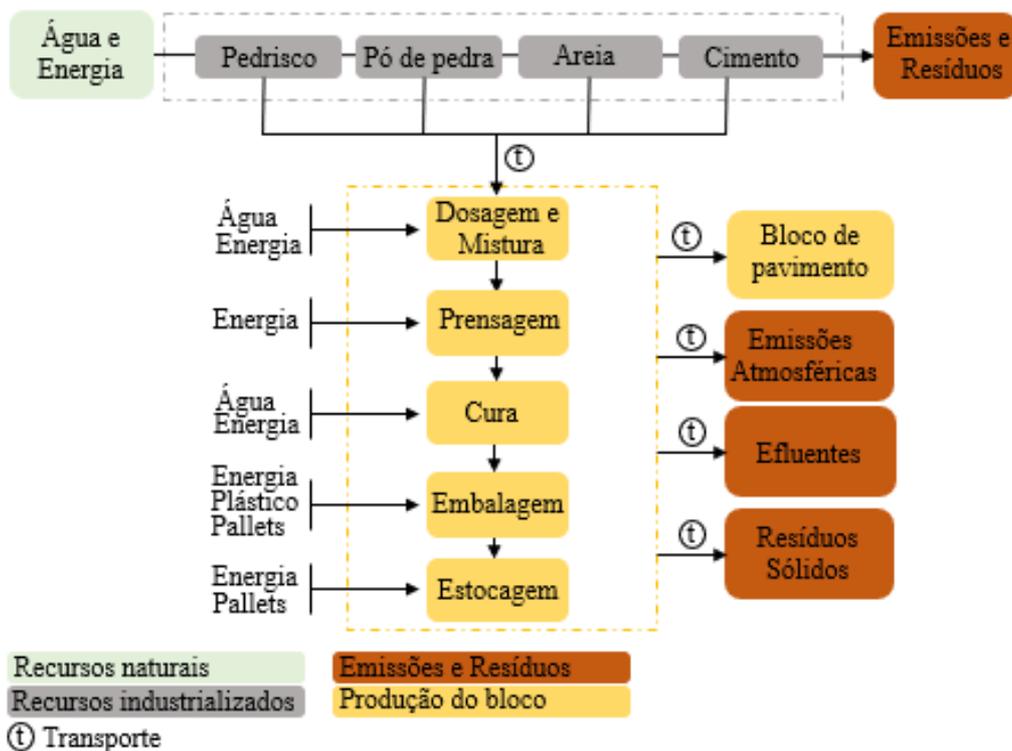
Pó de brita: a densidade aparente do pó de brita foi fornecida pela indústria de pré-moldados, adotando-se o valor de 1,53 t/m³.

Areia fina: a densidade aparente da areia foi fornecida pela indústria de pré-moldados, adotando-se o valor de 1,46 t/m³.

A fase de produção do bloco de pavimento intertravado de concreto na fábrica de pré-moldado é responsável por uma parcela do consumo global de energia e da emissão de CO₂ do ciclo de vida do bloco de pavimento, que será calculada através dos valores intrínsecos (energia incorporada EI e emissão de CO₂) das fontes energéticas empregadas no processo produtivo: máquina Piorott, equipamento utilizado para fabricação do bloco de pavimento intertravado de concreto.

Foram coletados os dados das matérias-primas, considerando extração e beneficiamento dos agregados, extração e produção do cimento e produção do bloco de pavimento, além da distância média para o transporte do material em cada fase do sistema de produção, apresentados na Figura 42.

Figura 42 Etapas avaliadas na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o levantamento das emissões, foram consideradas as etapas de extração e beneficiamento da matéria prima para produção dos agregados e do cimento. Na Tabela 27 são apresentados os dados usados para emissão de CO₂ e da energia incorporada EI de cada material de construção empregado para produção do bloco de pavimento intertravado de concreto.

Tabela 27 Fatores de emissão de CO₂ e energia incorporada EI para os materiais empregados na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto

Matéria Referência	kgCO ₂ /t	Energia (MJ/t)
Areia natural	10,89	155,76
Pedrisco	6,73	110,64
Pó de pedra	6,20	103,66
Cimento CP V	799	3366

Fonte: Elaborado pelo autor

A origem das principais emissões CO₂ do CPV-ARI é a queima de combustíveis fósseis e de gás natural para a produção do clínquer; já as emissões CO₂ do agregado graúdo e miúdo são resultados do uso de energia elétrica e combustíveis fósseis utilizados no transporte dos materiais. O Diesel, combustível fóssil, é considerado o produto com maior carga ambiental.

No caso do cimento, foi utilizada fonte secundária para o levantamento da emissão de CO₂ e a energia incorporada EI dos estudos de Felix e Possan (2018), que consideraram os teores de clínquer permitidos para a produção do cimento, e em que são contabilizados a extração de argila, calcário e outros minerais, o transporte deles até a fábrica de cimento, e o processamento que nela ocorre, como a produção do clínquer e moagem.

Após o beneficiamento dos materiais, estes são levados à fábrica de pré-moldados Original Blocos localizada em Brasília, Guará - DF, para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto. Neste estudo foi considerada a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto master com dimensões 6,0 cm x 11,0 cm x 21,6 cm e 39,5 unid./m², representado na Figura 43.

Figura 43 Bloco de pavimento intertravado de concreto master 6,0 cm x 11,0 cm x 21,6 cm



Fonte: Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público (ABCP, 2010, página 11)

Os agregados são armazenados em baias e o cimento em silos próprios. Os insumos são transportados até misturadores através de correias, onde é realizada a mistura dos materiais. Durante a mistura, é realizado o acréscimo da água necessária para se alcançar a umidade desejada, de modo a atingir a trabalhabilidade adequada para a moldagem na vibro prensa.

Toda matéria-prima empregada na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto é fornecida pelas mineradoras localizadas em Samambaia-DF e Padre Bernardo-GO. A Tabela 28 apresenta a quantidade de material para a produção de uma unidade e do (m²) do bloco pavimentado de concreto.

Tabela 28 Quantidade material para a produção de uma und e m²

Produção (Bloco de pav. Intertravado de concreto)	kg/und (5,45 kg)	kg/m ² (39,5 pc)
<i>Areia fina natural</i>	0,88	34,87
<i>Pó de pedra</i>	2,69	106,12
<i>Brita 0 (Pedrisco)</i>	1,15	45,48

<i>Cimento CP V (50 Mpa)</i>	0,73	28,80
Massa Total / kg	5,45	215,28

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1.3 Ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto

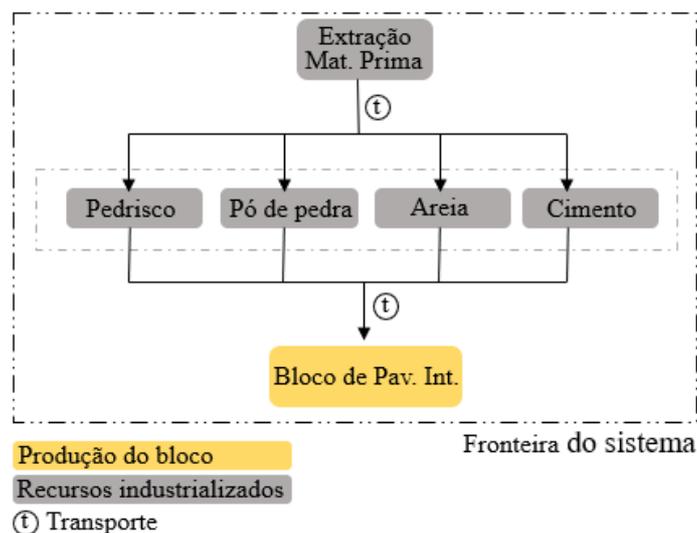
Nesta etapa, foram quantificadas as emissões CO₂ e energia incorporada aos materiais para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para os cenários berço ao portão, berço ao berço e berço ao túmulo, com objetivo de avaliar o perfil ambiental do bloco de pavimento, avaliando os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo do ciclo de vida do produto.

Considerando o bloco de pavimento intertravado de concreto como artefato de concreto, usualmente é realizada uma desconstrução em vez da demolição, tendo um aproveitamento em média de 80% do material. Porém, para o estudo, contabilizamos a demolição e reciclagem de 100% do bloco de pavimento intertravado de concreto.

(1) Cenário A - berço ao portão

O cenário berço ao portão tem como propósito a identificação dos potenciais impactos ambientais da produção do bloco de pavimento intertravado de concreto referente às emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI. A Figura 44 apresenta a estrutura do cenário em estudo.

Figura 44 Etapas avaliadas na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao portão



Fonte: Autor

Foram empregadas as metodologias de ACVCO₂ e ACVE para o cálculo de emissões de CO₂ e do consumo de energia EI, considerado a etapa de extração, beneficiamento dos materiais, produção do bloco e transporte. A Tabela 29 apresenta a quantidade de materiais e emissões CO₂ e energia incorporada para produção do m² (39,5 unid.) do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao portão.

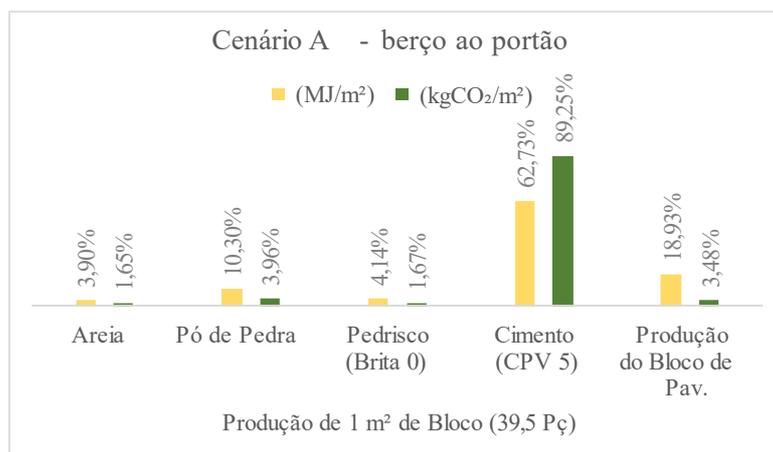
Tabela 29 Inventario para o cenário berço ao portão

Cenário A - berço ao portão		Distância	UF	kg / m²	Energia (MJ/UF)	Emissão (kgCO₂/UF)
Matéria Prima	m ³					
Areia	m ³		1,46 t/m ³	34,87	3,72	0,26
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	34			0,64	0,04
Pó de Pedra	m ³		1,53 t/m ³	106,12	7,19	0,43
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	76			4,32	0,30
Pedrisco (Brita 0)	m ³		1,70 t/m ³	45,48	2,77	0,18
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	76			1,85	0,13
Cimento (CPV 50)	m ³		1,40 t/m ³	28,80	69,25	16,44
Transportes	5,8 Km/l	54			0,83	0,06
Produção Piso Intertr.	m ²		1 m ²	39,5 unid.	17,69	0,21
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	30		215,3	3,46	0,43
Total de Emissões (kgCO₂) e Energia (MJ) / m²					111,74	18,48

Fonte: Elaborado pelo autor

O cenário do berço ao portão apresentou um total de emissões de 18,42 kgCO₂/m² e energia incorporada de 111,74 MJ/m² com 39,50 unid./m² do bloco de pavimento intertravado de concreto. A Figura 45 apresenta o resultado obtido no estudo da AICV do cenário berço ao portão.

Figura 45 Quantidade de emissões de kgCO₂/m² e MJ/m² em cada material na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao portão



Fonte: Autor

O estudo identificou o cimento CPV como responsável pela maior parte dos impactos ambientais correspondendo a emissões de 89,25% kgCO₂/m² e energia incorporada de 62,73% MJ/m², seguida da produção do bloco de pavimento com emissões 3,48 kgCO₂/m² e energia incorporada 18,93% e pó de pedra com emissões de 3,96% kgCO₂/m² e energia incorporada de 10,30% MJ/m².

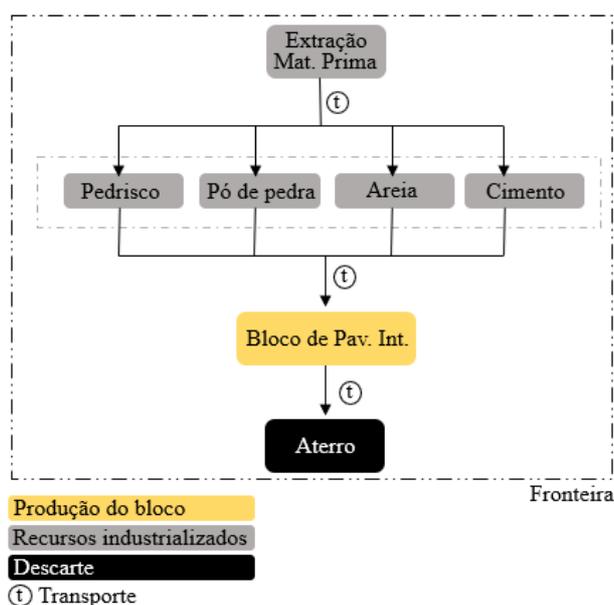
(2) Cenário B - berço ao túmulo

O cenário berço ao túmulo teve como propósito a identificação dos potenciais impactos ambientais do descarte do bloco de pavimento intertravado de concreto em aterro sanitário de resíduos da construção civil, quantificando as emissões de CO₂ e energia incorporada EI para a destinação final do produto, encerrando o ciclo de vida do produto.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis e não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

A disposição em aterros deve seguir as normas e regulamentações vigentes, que estabelecem critérios para o projeto, operação e monitoramento desses locais. Os aterros devem ser construídos de forma a garantir a impermeabilização do solo, a cobertura diária do material depositado, o controle de gases e líquidos gerados e a adoção de medidas para prevenir a atração de vetores de doenças. A Figura 46 apresenta a estrutura do cenário em estudo.

Figura 46 Etapas avaliadas para o cenário do berço ao túmulo



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi empregada a metodologia de ACVCO₂ e ACVE para o cálculo de emissões de CO₂ e do consumo de energia EI, considerado a etapa de extração, beneficiamento dos materiais, produção, transporte e destinação final. A Tabela 30 apresenta o inventário do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao túmulo.

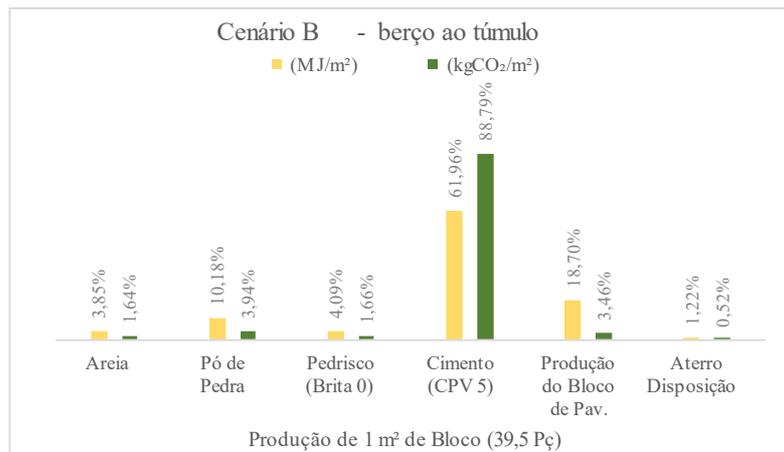
Tabela 30 Quantidade de materiais e emissões para produção do bloco de pavimento intertravado de concreto por m² para o cenário berço ao túmulo

Cenário B - berço ao túmulo		Distância	UF	kg / m ²	Energia (MJ/UF)	Emissão (kgCO ₂ /UF)
Matéria Prima	m ³					
Areia	m ³		1,46 t/m ³	34,87	3,72	0,26
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	34			0,64	0,04
Pó de Pedra	m ³		1,53 t/m ³	106,12	7,19	0,43
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	76			4,32	0,30
Pedrisco (Brita 0)	m ³		1,54 t/m ³	45,48	2,77	0,18
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	76			1,85	0,13
Cimento (CPV 50) (12 t)	m ³		1,40 t/m ³	28,80	69,25	16,44
Transportes	5,8 Km/l	54			0,83	0,06
Produção Piso Intert.	m ²		1 m ²	39,5 unid.	17,69	0,21
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	30		215,3	3,46	0,43
Aterro Disposição (15 km)	1,8 Km/l	15	1 m ²	215,3	0,90	0,06
Transportes (12 t)	5,8 Km/l	50	1 m ²	215,3	0,48	0,03
Total de Emissões (kgCO ₂) e Energia (MJ) / m ²					113,12	18,58

Fonte: Elaborado pelo autor

O cenário do berço ao túmulo apresentou um total de emissões de 18,58 kgCO₂/m² e energia incorporada de 113,12 MJ/m² com 39,50 unid./m² do bloco de pavimento intertravado de concreto. A Figura 47 apresenta o resultado obtido no estudo da AICV do cenário berço ao túmulo.

Figura 47 Quantidade de emissões de kgCO₂/m² e MJ/m² em cada material na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao túmulo



Fonte: Elaborado pelo autor

No cenário berço ao túmulo, o estudo demonstrou que a disposição em aterro de resíduos da construção civil representa um percentual de 0,52% kgCO₂/m² de emissões CO₂ e 1,22% MJ/m² de energia incorporada para 1 m² de entulho. A disposição do bloco como resíduo no aterro sanitário de resíduos da construção civil apresentou o menor impacto na cadeia produtiva.

A disposição adequada no aterro sanitário de resíduos da construção civil é uma medida importante para garantir a sustentabilidade da construção civil e minimizar os impactos ambientais negativos. Para isso, é necessário seguir as recomendações técnicas para a disposição dos resíduos e adotar medidas de controle ambiental para minimizar os impactos da disposição do resíduo no aterro sanitário.

(3) Cenário C - berço ao berço

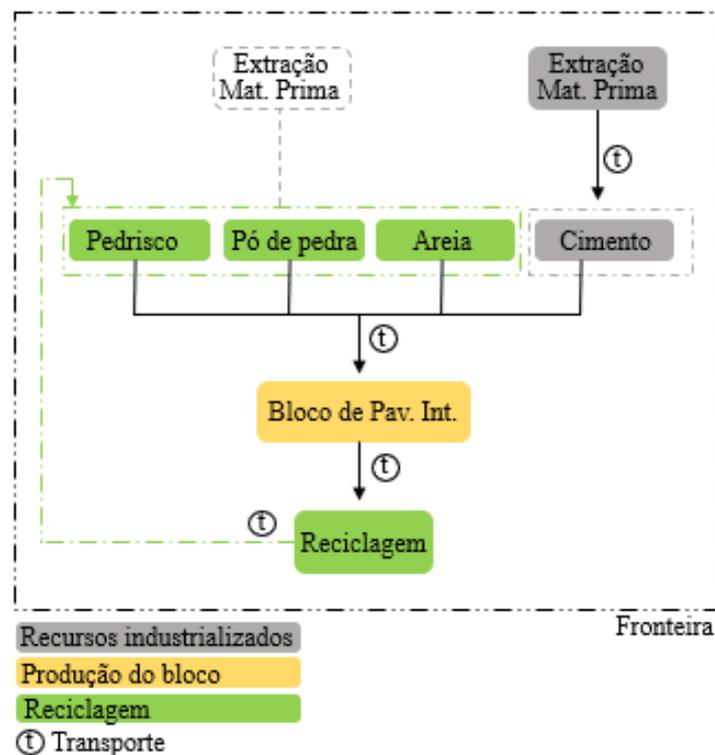
O cenário berço ao berço teve como propósito a identificação dos potenciais impactos ambientais da produção do bloco de pavimento intertravado de concreto referente às

emissões de CO₂ e à energia incorporada para a substituição dos agregados naturais como: pedrisco, pó de pedra e areia fina por agregados reciclados de concreto (ARC).

O processo de reciclagem pode ser considerado de forma simplificada como um beneficiamento do material a ser reciclado, que compreende um conjunto de quatro operações, divididas em triagem, britagem, peneiramento e classificação. Nesta fase, temos apenas consumo de energia elétrica e água para umidificar o material particulado suspenso pelo equipamento de britagem.

Foram adotados os valores de Sacho et al. (2016) e Rossi (2013) para os cálculos de emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI no agregado reciclado para produção de 1 t. A densidade aparente do agregado reciclado foi fornecida pela indústria de pré-moldados, adotando-se o valor de 1,45 t/m³. A Figura 48 apresenta a estrutura do cenário em estudo.

Figura 48 Etapas avaliadas na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao berço



Fonte: Elaborado pelo autor

A produção do agregado reciclado de concreto (ARC) é realizada no próprio canteiro da fábrica de pré-moldados Original Blocos. O agregado reciclado é produzido com os

artefatos de concreto que por algum motivo não puderam ser comercializados, por algum defeito na fabricação. A Tabela 31 apresenta a quantidade de emissões CO₂ e energia incorporada para a produção de 1 t de agregado reciclado.

Tabela 31 Energia incorporada EI e emissão de CO₂ na produção do agregado reciclado

Produção do Agregado reciclado	Energia incorporada (MJ/t)	Emissão (kgCO ₂ /t)
Agregado Reciclado ARC	19,90	1,90

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi empregada a metodologia de ACVCO₂ e ACVE para o cálculo de emissões de CO₂ e do consumo de energia EI, considerado a etapa de extração e beneficiamento dos materiais, produção, transporte e reciclagem do bloco de pavimento intertravado de concreto. A Tabela 32 apresenta o inventário do ciclo de vida bloco de pavimento para o cenário berço ao berço e a quantidade de emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI para o cenário berço ao berço.

Tabela 32 Quantidade de materiais e emissões para produção do bloco de pavimento intertravado de concreto por m² para o cenário berço ao berço

Cenário C - berço ao berço		Distância	UF	kg / m ²	Energia (MJ/UF)	Fator de Emissão (kgCO ₂ /UF)
Matéria Prima	m ³					
Areia - Reciclada	m ³		1,45 t/m ³	34,87	0,48	0,05
Transportes	5,8 Km/l	30			1,13	0,04
Pó de Pedra - Reciclada	m ³		1,45 t/m ³	106,12	1,46	0,14
Transportes	5,8 Km/l	30			2,28	0,12
Pedrisco (Brita 0) - Reciclada	m ³		1,45 t/m ³	45,48	0,62	0,06
Transportes	5,8 Km/l	30			1,30	0,05
Cimento (CPV 50)	m ³		1,40 t/m ³	28,80	69,25	16,44
Transportes	5,8 Km/l	54			0,83	0,06
Produção Piso Intertravado	m ²		1 m ²	39,5 unid.	2,95	0,28
Transportes	5,8 Km/l	30		215,30	3,98	0,24
Reciclagem	m ³		1,45 t/m ³	215,30	2,95	0,28
Transportes	5,8 Km/l	30		215,30	4,03	0,24
Total de Emissões (kgCO ₂) e Energia (MJ) / m ²					91,27	18,00

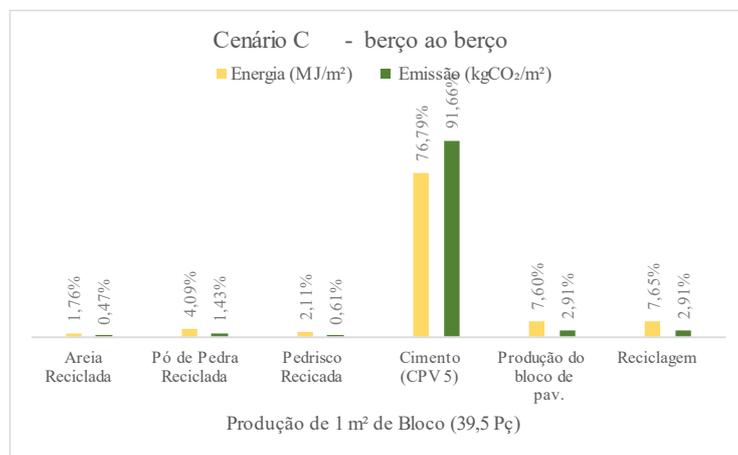
Fonte: Elaborado pelo autor

A distância entre a coleta, reciclagem e a entrega do agregado reciclado ao consumidor é um fator influenciador na quantidade de emissões e energia incorporada. O estudo do

cenário do berço ao berço apresentou um total de emissões de 18,00 kgCO₂/m² e energia incorporada de 91,27 MJ/m² com 39,50 unid./m² pavimento intertravado de concreto.

A Figura 49 apresenta a quantidade de emissões de CO₂ e energia incorporada EI para o cenário berço ao berço. O estudo tem o propósito de avaliar os impactos ambientais na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, produzido com agregado reciclado de concreto (ARC) em substituição dos agregados naturais como: pedrisco, pó de pedra e areia fina.

Figura 49 Quantidade de emissões de kgCO₂/m² e MJ/m² em cada material na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto para o cenário berço ao berço



Fonte: Elaborado pelo autor

No cenário berço ao berço, o estudo demonstrou que a reciclagem do entulho representa um percentual de 2,91% kgCO₂/m² de emissões CO₂ e 7,65% MJ/m² de energia incorporada.

O estudo demonstrou que a reciclagem do bloco para produção de agregados reciclados e a substituição dos agregados naturais apresentam uma redução nas emissões CO₂ e energia incorporada do bloco de pavimento intertravado de concreto.

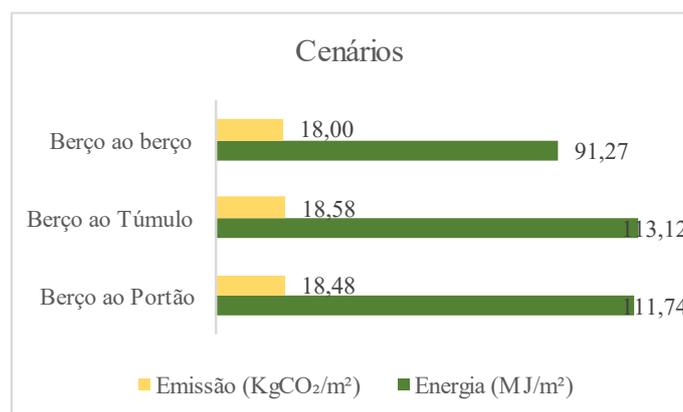
(4) Estudo comparativo dos cenários A, B e C

Foi realizado um estudo comparativo para os cenários berço ao túmulo, berço ao berço e berço ao portão. O cenário do berço ao portão está contemplado pelo cenário berço ao túmulo, possibilitando a análise.

Para o cenário berço ao túmulo, houve um acréscimo nas emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI comparado ao cenário berço ao portão, ocasionado pela destinação final em aterro de resíduos da construção civil; esse acréscimo é atribuído ao uso do Diesel utilizado nos equipamentos de transporte e na disposição do entulho no aterro.

No comparativo do cenário berço ao portão com o cenário berço ao berço, houve uma redução nas emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI. Esta redução é atribuída à reutilização de materiais reciclados, deixando de ocorrer os impactos da extração das matérias-primas como areia fina, pó de pedra e pedrisco. Entretanto, essa redução foi pouco expressiva para as emissões de dióxido de carbono, sendo mais expressiva para a redução de energia incorporada EI. A Figura 50 apresenta o comparativo dos cenários estudados.

Figura 50 Estudo comparativo dos cenários berço ao berço, berço ao portão e berço ao túmulo



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 ETAPA 3 - ESTABELECIMENTO DO *BENCHMARK*

Nesta parte se obtém o perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto, demonstrando as cargas ambientais a que cada etapa, fase ou componente corresponde no ciclo de vida do bloco, tendo como indicadores de sustentabilidade preestabelecidos as emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI.

Essa informação é fundamental nos dias de hoje para tornar um produto competitivo e atraente para seus consumidores. Através do diagnóstico que os resultados oferecem, é possível fazer um planejamento para melhorar ambientalmente esse produto. Identificam-se os pontos críticos com maior carga ambiental, para mensurar melhorias ambientais,

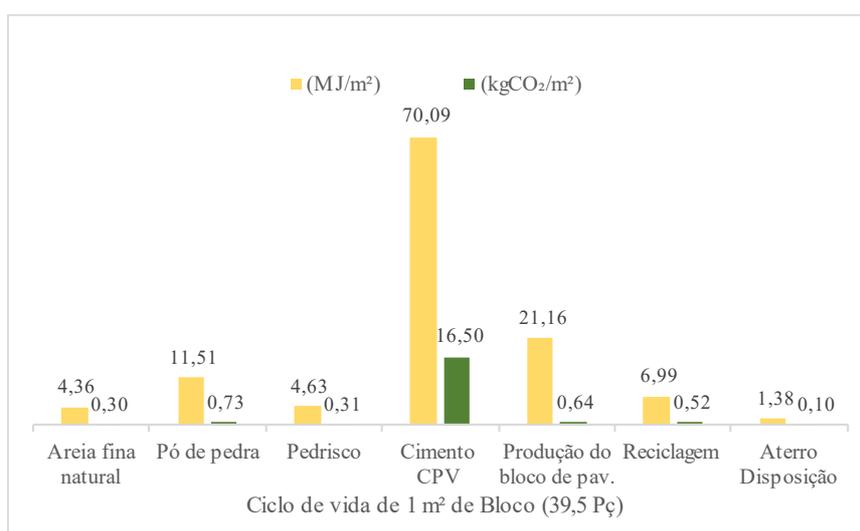
desta forma cogitando a possível substituição por outros que apresentem uma redução das cargas ambientais.

O perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto é obtido através de indicadores de impactos ambientais que sua produção, uso e descarte podem vir a provocar. Essa informação, passada ao consumidor, pode informar um diferencial que esse produto possui em relação aos demais da mesma categoria e pode ser uma ferramenta para impulsionar o consumo de materiais com menores impactos ambientais.

Ao determinar a quantidade de matéria-prima, processos, quantidade de emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI, é possível estabelecer um panorama completo do impacto ambiental do bloco, e como resultado traçar seu perfil ambiental. Podemos demonstrar o perfil ambiental total ou compartmentado.

A Figura 51 e a Figura 52 demonstram a carga ambiental que cada componente e etapa gera no ciclo de vida do produto, por meio das emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI.

Figura 51 Emissões CO₂ e energia incorporada no ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto



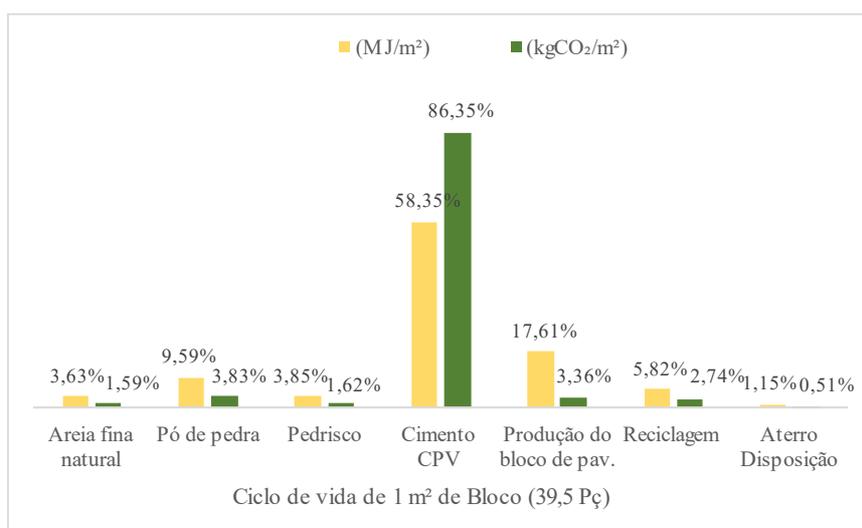
Fonte: Elaborado pelo autor

Para análise do perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto, estabelecemos como componentes de seu ciclo de vida: areia fina natural, pó de pedra natural, pedrisco natural, cimento CPV, produção do bloco de pavimento, reciclagem do bloco de pavimento e destinação final em aterro de resíduos da construção civil.

A Figura 51 apresenta o cimento CPV como responsável pela maior carga ambiental no bloco de pavimento, com uma quantidade de 16,50 kgCO₂/m² de emissões CO₂ e 70,09 MJ/m² de energia incorporada. A Figura 52 apresenta a porcentagem de kgCO₂/m² e MJ/m² que cada componente representa na produção de 1 m² do bloco de pavimento intertravado de concreto (39,5 unid.).

O perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado detectou o cimento como principal agente de impactos ambientais, seguido pela produção do bloco de pavimento e pó de pedra. Como a produção do bloco de pavimento acontece industrialmente através de máquina prensa, e a intervenção operacional acarretaria custos em maquinário, optou-se por avaliar a substituição de seus materiais, que estão em livre acesso no mercado a custo competitivo.

Figura 52 Porcentagem do impacto ambiental que cada componente representa no ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto

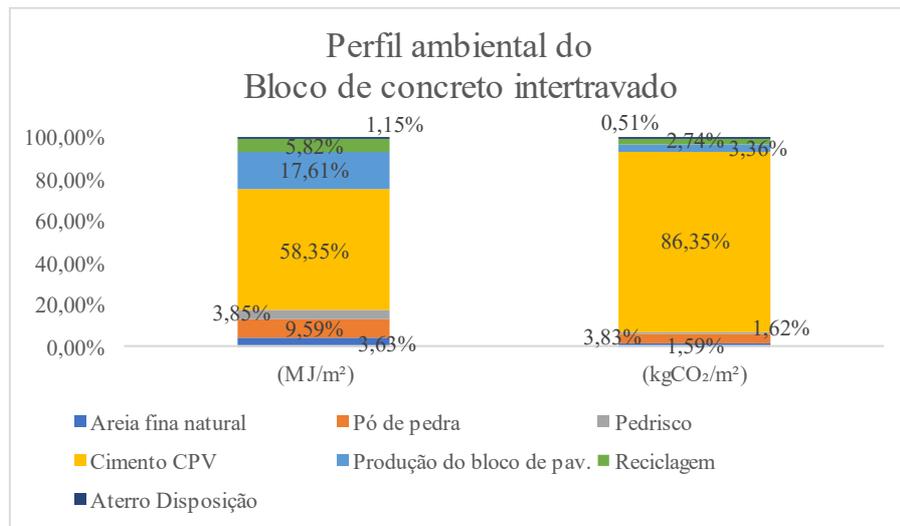


Fonte: Elaborado pelo autor

O cimento CPV é responsável por 86,35% kgCO₂/m² de emissões CO₂ e 58,35% MJ/m² de energia incorporada no ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto; em segundo lugar, temos o pó de pedra com 3,83% kgCO₂/m² de emissões CO₂ e 9,59% MJ/m² de energia incorporada como demonstra a Figura 52.

A Figura 53 demonstra o perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto, de forma compartimentada, obtido pelas cargas ambientais que cada componente representa no ciclo de vida do bloco separadamente.

Figura 53 Perfil ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no perfil ambiental é estabelecido o desempenho de referência ou *benchmark*, com base nos indicadores de sustentabilidade. Define-se, assim, uma referência para o desempenho ambiental do bloco, permitindo a rápida comparação, avaliação, e identificação de potencial para melhorias ambientais.

O benchmark é o ato de comparar de forma eficiente a performance, neste caso o desempenho ambiental, comparando de maneira equivalente as melhorias ambientais. A Tabela 33 apresenta o desempenho de referência (*benchmark*).

Tabela 33 Desempenho de referência (*benchmark*)

	Energia (MJ/m ²)	Emissão (kgCO ₂ /m ²)
Berço ao Portão	111,74	18,48

Fonte: Elaborado pelo autor

O benchmark deverá atender a todas as possíveis comparações, de forma direta e equivalente para os componentes com melhorias ambientais relacionadas aos seus indicadores de sustentabilidade avaliados.

O estudo do ciclo de vida do bloco de pavimento intertravado de concreto contribuiu para identificar as oportunidades e melhorias no aspecto ambiental do componente. No caso em estudo, foram levantados como fatores passíveis de redução os impactos relacionados ao uso do cimento CPV, da areia fina natural e do pedrisco, por apresentar maior carga

de impactos ambientais relacionados à emissão de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI.

4.4 ETAPA 4 - DIRECIONAMENTO DAS AÇÕES PARA MELHORIAS AMBIENTAIS

Nesta etapa são apresentados materiais com menores cargas ambientais para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, estimulando desta forma soluções ambientais, levantando ideias e viabilizando melhorias, desenvolvendo variáveis para um bloco com menor carga ambiental. Na etapa anterior optou-se por avaliar a substituição de seus materiais integrantes como: areia fina natural, pó de pedra britado, pedrisco, cimento CPV, que estão em livre acesso no mercado a custo competitivo.

A emissão de dióxido de carbono CO₂ e a energia incorporada EI devidas à extração, transporte e processamento dos agregados de referência utilizado para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 Emissão de CO₂ e energia incorporada dos materiais de referência

Material Referência	kgCO ₂ /t	Energia (MJ/t)
Areia natural	10,89	155,76
Pedrisco	6,73	110,64
Pó de pedra	6,20	103,66
Cimento CP V	799	3366

Fonte: Elaborado pelo autor

As ações para melhorias ambientais têm a função de levantar ou identificar os materiais similares passíveis de substituição total ou parcial por outros que apresentem menores cargas ambientais em emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI, criando desta forma variáveis para o bloco de pavimento com menor carga ambiental. Esta parte da metodologia é responsável por apresentar os materiais substituintes para o estudo.

Os impactos causados pela produção dos agregados para concreto e materiais de construção no Brasil ainda são pouco pesquisados, porém as pesquisas já realizadas demonstram que os impactos do processamento podem variar dependendo dos equipamentos, fontes energéticas utilizadas e distância que o material precisará ser transportado.

Como resultado das ações para melhorias ambientais, criou-se a possibilidade de substituição por materiais com menores cargas ambientais para a produção de um bloco de pavimento intertravado de concreto com menor impacto ao meio ambiente. A Tabela 35, a Tabela 36 e a Tabela 37 apresentam os materiais de referência e seus materiais substituintes na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto. Todos os materiais substituintes são produzidos e encontrados no entorno de Brasília.

Tabela 35 Material substituinte para areia fina natural

Areia fina natural	Areia reciclada (RCD)	Areia britada
Material de Referência	A _{rcd}	A _{bt}

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 36 Materiais substituintes para o pedrisco

Pedrisco Britado	Pedrisco de seixo britado	Pedrisco reciclado RCD	Pedrisco de agregado reciclado de concreto
Material de Referência	P _{sb}	P _{rcd}	P _{arc}

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 37 Materiais substituintes para o cimento CPV

Cimento CPV	Cimento CP II-E	Cimento CP III	Cimento CP IV	Cimento LC ³
Material de Referência	CP II-E	CP III	CP IV	LC ³

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 38 apresenta os materiais substituintes e seus fornecedores; todos os materiais substituintes foram coletados na região de Brasília e entorno.

Tabela 38 Materiais substituintes e fornecedores

Areia reciclada (RCD)	Fornecedor 01
Areia britada (artificial)	Fornecedor 02
Pedrisco de seixo britado	Fornecedor 03
Pedrisco reciclado RCD	Fornecedor 01
Pedrisco reciclado ARC	Fornecedor 04
Cimento CP II-E	Fornecedor 05
Cimento CP III	
Cimento CP IV	
Cimento LC ³	

Fonte: Elaborado pelo autor

Foram coletados os dados sobre as emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI devidas à extração, transporte e processamento dos materiais

substituintes. A Tabela 40 apresenta um comparativo do material de referência e do material substituinte.

Tabela 39 Emissão de CO₂ e energia incorporada dos agregados levantados como substituintes

Matéria prima	Emissão (MS) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MR) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MS)/ Emissão (MR)	Energia (MS) (MJ/t)	Energia (MR) (MJ/t)	Energia (MS)/ Energia (MR)
Areia reciclada (A _{rcd})	12,07	10,89	1,11	61,77	155,76	0,40
Areia britada (A _{bt})	9,22	10,89	0,85	56,83	155,76	0,36
Pedrisco de seixo (P _{sb})	43,81	6,73	6,51	100,71	110,64	0,91
Pedrisco reciclado (P _{rcd})	27,07	6,73	4,02	61,77	110,64	0,56
Pedrisco reciclado (P _{arc})	6,52	6,73	0,97	44,03	110,64	0,40

MS - Material Substituinte

MR - Material de Referência

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas colunas “Energia (MS)/ Energia (MR) e Emissão (MS)/ Emissão (MR)”, presentes na Tabela 39, são realizadas comparações da carga ambiental em emissões CO₂ e energia incorporada para os materiais substituintes: areis reciclada, areia britada, pedrisco de seixo, pedrisco reciclado de RCD e pedrisco reciclado de ARC. Foram consideradas as densidades dos materiais para a conversão de toneladas para metro cúbico (m³) e metro quadrado (m²).

A variação na quantidade de clínquer permitida no cimento nacional faz com que o consumo energético e a emissão de CO₂ na sua produção variem de acordo com a disponibilidade das adições. Os estudos realizados por Oliveira (2015a) estimam uma faixa de emissão e energia incorporada para os diferentes tipos de cimento, considerando a média nacional e os teores de clínquer normatizados. Desses estudos, foram adotados os teores e o valor médio das emissões e do consumo energético para a produção do cimento.

A produção de cimentos comercializados no Brasil apresenta uma faixa mínima e máxima das emissões CO₂ e de energia incorporada para seus diferentes os tipos de cimento. Essa faixa de variação se refere aos teores de clínquer mínimos e máximos permitidos em norma. Para o estudo, foi considerado um valor médio entre os dois extremos da faixa. Os valores adotados para o cimento LC³ foram retirados dos estudos de (SÁNCHEZ et al., 2016); (CANCIO DÍAZ et al., 2017); (FRÖHLICH, 2019) e (ZHANG et al., 2020). A Tabela 40 apresenta as emissões de CO₂ e energia incorporada para os cimentos estudados.

Tabela 40 Emissão de CO₂ e energia incorporada para os cimentos

Material Substituinte	Emissão (MS) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MR) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MS)/Emissão (MR)	Energia (MS) (MJ/t)	Energia (MR) (MJ/t)	Energia (MS)/Energia (MR)
CP II-E	607	799	0,76	2256	3366	0,67
CP III	351	799	0,44	2196	3366	0,65
CP IV	522	799	0,65	2296	3366	0,68
LC ³	468	799	0,59	2500	3366	0,74

MS - Material Substituinte

MR - Material de Referência

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas colunas “Energia (MS)/ Energia (MR) e Emissão (MS)/ Emissão (MR)”, presentes na Tabela 40, são realizadas comparações da carga ambiental em emissões CO₂ e energia incorporada para os materiais substituinte.

Como resultado das ações para melhoria ambiental temos 2 (dois) materiais substituintes para o agregado miúdo, 3 (três) materiais substituintes para o agregado graúdo e 4 (quatro) materiais substituintes para o aglomerante, totalizando 9 (nove) materiais substituintes.

4.5 ETAPA 5 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DE DESEMPENHO

Nesta etapa é determinado o fator de desempenho F_d dos blocos com os materiais substituintes, indicados como solução para melhorias ambientais no bloco de pavimento intertravado de concreto, com objetivo de reduzir a sua carga ambiental. Foi levada em consideração a densidade dos materiais para a conversão de toneladas para metro cúbico (m³) e metro quadrado (m²).

A Tabela 41, a Tabela 42, a Tabela 43, a Tabela 44, a Tabela 45, a Tabela 46, a Tabela 47, a Tabela 48, e a Tabela 49 apresentam as composições, as emissões CO₂ e energia incorporada para os blocos com os materiais substituintes.

Tabela 41 Composição do Bloco - A_{recd}

Bloco - A _{recd}	(kgCO ₂ /m ²)	(MJ/m ²)
Areia reciclada	0,29	1,49
Pó de Pedra	0,73	11,51
Pedrisco	0,31	4,62
Cimento CPV 50	16,5	70,08
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	18,47	108,85

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 42 Composição do Bloco - A_{bt}

Bloco - A_{bt}	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
<i>Areia britada artificial</i>	0,21	1,32
Pó de Pedra	0,73	11,51
Pedrisco	0,31	4,62
Cimento CPV 50	16,5	70,08
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	18,39	108,68

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 43 Composição do Bloco - P_{sb}

Bloco - P_{sb}	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51
<i>Pedrisco de seixo</i>	1,33	3,05
Cimento CPV 50	16,50	70,08
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	19,50	110,15

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 44 Composição do Bloco - P_{rcd}

Bloco - P_{rcd}	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51
<i>Pedrisco RCD</i>	0,85	1,94
Cimento CPV 50	16,50	70,08
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	19,02	109,04

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 45 Composição do Bloco - P_{arc}

Bloco - P_{arc}	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51
<i>Pedrisco ARC</i>	0,19	1,31
Cimento CPV 50	16,50	70,08
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	18,36	108,41

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 46 Composição do Bloco - CPIIE

Bloco - CPIIE	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51

Pedrisco	0,31	4,62
<i>Cimento CP II - E</i>	12,49	46,41
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	14,47	88,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 47 Composição do Bloco - CPIII

Bloco - CPIII	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51
Pedrisco	0,31	4,62
<i>Cimento CP III</i>	7,22	45,17
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	9,20	86,81

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 48 Composição do Bloco - CPIV

Bloco - CPIV	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51
Pedrisco	0,31	4,62
<i>Cimento CP IV</i>	10,74	47,23
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	12,72	88,87

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 49 Composição do Bloco - LC³

Bloco - LC³	(kgCO₂/m²)	(MJ/m²)
Areia	0,3	4,36
Pó de Pedra	0,73	11,51
Pedrisco	0,31	4,62
<i>Cimento LC³</i>	9,63	51,43
Produção Bloco	0,64	21,15
Total	11,61	93,07

Fonte: Elaborado pelo autor

O fator de desempenho dos blocos com melhorias ambientais tem dependência diretamente com a Etapa 3 - Perfil ambiental. O fator de desempenho F_d é uma comparação direta e equivalente do componente com o material substituinte e o *benchmark*, ou seja, uma ponderação direta do total de emissões CO₂ e energia incorporada EI dos blocos com os materiais substituintes em relação ao total de emissões CO₂ e energia incorporada EI do bloco de referência.

O bloco de referência ou desempenho de referência (*benchmark*) é utilizado para comparação do desempenho ambiental dos blocos com os materiais substituintes. A Tabela 50 apresenta o total das emissões de CO₂ e energia incorporada EI para os blocos com os materiais substituintes e para o bloco referência. O Bloco-P_{sb} e o Bloco-P_{rcd} apresentaram emissões CO₂ superiores ao bloco de referência, e por isso foram descartadas para a Etapa 6 - Análise de risco.

Tabela 50 Total das emissões CO₂ e energia incorporada EI para o bloco referência e para os blocos com os materiais substituintes.

Blocos	(kgCO ₂ /m ²)	(MJ/m ²)
Bloco de Referência	18,48	111,72
Bloco - A _{rcd}	18,47	108,85
Bloco - A _{bt}	18,39	108,68
Bloco - P _{sb}	19,50	110,15
Bloco - P _{rcd}	19,02	109,04
Bloco - P _{arc}	18,36	108,41
Bloco - CPIIE	14,47	88,05
Bloco - CPIII	9,20	86,81
Bloco - CPIV	12,72	88,87
Bloco - LC ³	11,61	93,07

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os indicadores de sustentabilidade teremos o fator de desempenho F_d para emissões F_{dCO_2} e o fator de desempenho para a energia incorporada F_{dEI} . A Equação 5 e a Equação 4 demonstram o cálculo realizado para determinar o fator de desempenho das emissões CO₂ e energia incorporada para os blocos com os materiais substituintes.

Determinado o fator de desempenho F_{dCO_2} e F_{dEI} dos blocos com os materiais substituintes, é possível planejar uma substituição total ou parcial dos materiais com menores cargas ambientais, visando uma possível redução de emissões de dióxido de carbono CO₂ e redução de energia incorporada EI. A Tabela 51 apresenta os fatores de desempenho F_{dCO_2} e F_{dEI} para dos blocos com os materiais substituintes.

Tabela 51 Fator de desempenho para as emissões F_{dCO_2} e para energia incorporada F_{dEI}

Blocos	F_{dCO_2}	F_{dEI}
Bloco - A _{rcd}	0,999	0,974
Bloco - A _{bt}	0,995	0,973
Bloco - P _{sb}	1,055	0,986
Bloco - P _{rcd}	1,029	0,976
Bloco - P _{arc}	0,994	0,970

Bloco - CPIIE	0,783	0,788
Bloco - CPIII	0,498	0,777
Bloco - CPIV	0,688	0,795
Bloco - LC ³	0,628	0,833

Fonte: Elaborado pelo autor

O cimento CPV é um tipo de cimento semelhante ao cimento comum, pois não possui aditivos em sua fórmula. Entretanto, seu método de fabricação dosa a argila e o calcário de forma diferenciada, com moagem fina, e devido às suas características físicas, ele adquire resistência mais rapidamente, possui cura rápida, e conseqüentemente é o cimento mais utilizado para a fabricação de artefatos de concreto.

O Bloco-P_{sb} e o Bloco-P_{rcd} foram descartados para a Etapa 6 - Realização da análise de risco por apresentarem fator de desempenho F_{dCO_2} superior ao Bloco referência.

4.6 ETAPA 6 – REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DE RISCO

O processo de identificar e analisar as incertezas do futuro bloco vem de um planejamento de gerenciamento dos riscos, que envolve a decisão de como será conduzido e avaliado o produto final. Só é possível controlar e gerenciar aquilo que é possível avaliar ou mensurar.

O gerenciamento dos riscos é a atividade de previsão, pela necessidade de controlar o resultado, de modo a assegurar os resultados esperados previamente, baseado em um conjunto de informações para que possamos tomar melhores decisões em nossas escolhas. Nesta etapa, são avaliadas as incertezas que os materiais podem ocasionar no estudo do aperfeiçoamento do bloco de pavimento intertravado de concreto.

A categoria de risco técnico envolve tudo que se refere à tecnologia inerente ao bloco de pavimento intertravado de concreto, como requisitos técnicos de qualidade e propriedades físico-mecânicas. A Tabela 52 apresenta os materiais para a substituição total do agregado miúdo, agregado graúdo e aglomerante, desta forma criando 7 materiais substituintes.

Tabela 52 Substituição total dos materiais de referência

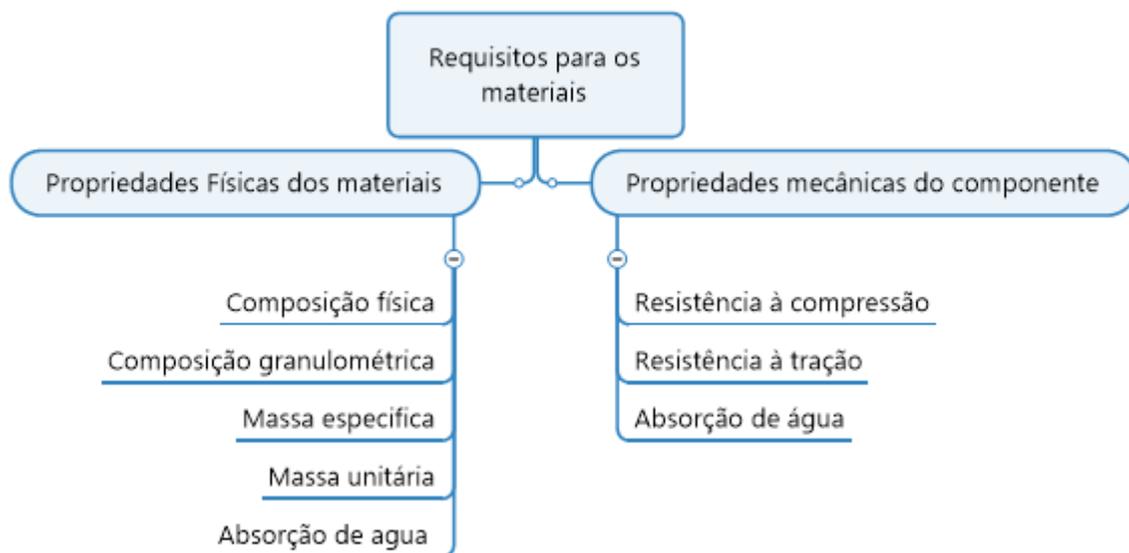
Material substituinte	Material de referência
Areia RCD	Areia fina natural
Areia britada	
Pedrisco ARC	Pedrisco britado rochoso
Cimento CP II-E	Cimento CP – V
Cimento CP III	

Cimento CP IV	
Cimento LC ³	

Fonte: Elaborado pelo autor

A categorização de riscos pode ser representada por uma estrutura analítica de risco (EAR), conforme a Figura 54, agrupando-se em níveis conforme seus grupos e categorias técnicas, propriedades físicas e mecânicas.

Figura 54 Estrutura analítica dos riscos EAR



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6.1 Identificação e avaliação dos riscos

A identificação dos riscos tem objetivo de gerar uma lista refinada daqueles que podem ameaçar ou gerar falhas com relação à produção do bloco de pavimento intertravado de concreto com os materiais substituintes, apresentando uma estrutura hierarquizada dos riscos levantados para um tratamento quantitativo. Uma vez identificados os riscos potenciais, é possível realizar a identificação de eventuais incertezas.

Foi utilizada a análise *Swot* adaptada para a metodologia ADAMC como ferramenta para a coleta de informações e identificação dos possíveis riscos aos materiais substituintes levantadas. A abordagem *swot* consiste em uma análise estratégica cuja abreviação significa forças, fraquezas, oportunidades e ameaças (do inglês *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*).

De forma a facilitar essa análise, adaptamos a abordagem *swot* à existência de fatores internos e externos aos materiais substituintes (risco de falhas ou incertezas). Nessa

análise deve ser considerado que, invariavelmente, por mais que se invista no confronto de cada risco, não será possível prevenir a ocorrência de imprevistos durante a execução. Porém, estes serão sempre moldados à luz de uma concepção do que há de vir no produto em estudo, e limitados ao nível de informações disponíveis e ao alcance dos pesquisadores no momento.

É necessário considerar as incertezas de cada um dos riscos identificados, para que estes possam ser tratados de modo adequado, tomando o máximo cuidado para não induzir os resultados esperados. Os fatores quantitativos são decisórios na atribuição do risco associado para os materiais substituintes em análise.

Os riscos são inseridos na Análise *Swot* pelos pesquisadores da metodologia ADAMC, e a coleta de informações acerca do conhecimento das propriedades e requisitos dos materiais analisados deve proporcionar uma correta análise do risco atribuído. As Tabelas 53 a 59 apresentam os riscos de falhas ou incertezas na produção do bloco com os materiais substituintes.

Tabela 53 Análise *Swot* Areia RCD

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituto (Areia RCD)	Risco 1. Presença de material cerâmico	Risco 1. Granulometria descontínua	Risco 1. Alta quantidade de finos e pulverulentos	Risco 1. Alta quantidade de finos e pulverulentos	Risco 2. Alta absorção	Risco 1. Baixa resistência	Risco 1. Baixa resistência	Risco 1. Alta a/c
	Risco 2. Presença de material orgânico					Risco 2. Baixo desempenho mecânico	Risco 2. Baixo desempenho mecânico	Risco 2. Alta porosidade
	Risco 3. Alta quantidade de finos e pulverulentos					Risco 3. Alta a/c	Risco 3. Alta a/c	Risco 3. Baixa resistência
Probabilidade de falhas	3	1	1	1	1	3	3	4

Fonte: Elaborado pelo autor

Areia RCD – Fator de risco associado à grande quantidade de materiais finos e pulverulentos, alta necessidade de água para atingir determinada trabalhabilidade e presença de materiais cerâmicos e materiais orgânicos.

Tabela 54 Análise *Swot* Areia britada

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituinte (Areia britada)	Risco 1. Alta quantidade de finos e pulverulentos	Risco 1. Granulometria descontínua	Risco 1. Alta quantidade de finos e pulverulentos	Risco 1. Alta quantidade de finos e pulverulentos	Risco 2. Alta absorção	Risco 2. Alta a/c	Risco 3. Alta 2ª/c	Risco 1. Alta a/c Risco 2. Alta porosidade
Probabilidade de falhas	1	1	1	1	1	1	1	2

Areia britada – Fator de risco associado à grande quantidade de materiais finos e pulverulentos, alta necessidade de água para atingir determinada trabalhabilidade.

Tabela 55 Análise *Swot* Pedrisco ARC

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituto (Pedrisco ARC)	Risco 1. Presença de materiais finos	Risco 1. Granulometria descontínua	Risco 1. Alta porosidade devido a argamassa aderida ao agregado reciclado	Risco 1. Alta porosidade devido a argamassa aderida ao agregado reciclado	Risco 2. Alta absorção	Risco 1. Alta a/c	Risco 1. Alta a/c	Risco 1. Alta a/c
Probabilidade de falhas	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Pedrisco ARC – Fator de risco associado às propriedades físico e mecânicas do agregado, alta porosidade devido a elevada quantidade de finos e argamassa aderida ao agregado reciclado enfraquecendo a zona de transição.

Tabela 56 Análise *Swot* Cimento CP II-E

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituto (Cimento CP II-E)	Risco 1. Uso em concreto hidráulico	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco 1. Baixo calor de hidratação	Risco 1. Baixo calor de hidratação	Risco inexistente
						Risco 2. Cura lenta	Risco 2. Cura lenta	
Probabilidade de falhas	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente	2	2	Inexistente

Fonte: Elaborado pelo autor

Cimento CP II-E – Fator de risco associado à sua composição química e sua utilização, composto de 94% a 56% de clínquer + gesso e 6% a 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa; cimento recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento.

Tabela 57 Análise Swot Cimento CP III

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituinte (Cimento CP III)	Risco 1. Uso em concreto hidráulico	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco 1. Baixo calor de hidratação	Risco 1. Baixo calor de hidratação	Risco inexistente
	Risco 2. Até 70% de escória de alto-forno					Risco 2. Cura lenta	Risco 2. Cura lenta	
Probabilidade de falhas	2	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente	2	2	Inexistente

Fonte: Elaborado pelo autor

Cimento CP III – Fator de risco associado a sua composição química e sua utilização; cimento Portland de alto-forno, tem em sua composição de 35% a 70% de escória de alto-forno. Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos.

Tabela 58 Análise *Swot* Cimento CP IV

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituto (Cimento CP IV)	Risco 1. Uso em concreto hidráulico	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco 1. Baixo calor de hidratação	Risco 1. Baixo calor de hidratação	Risco inexistente
	Risco 2. Até 50% de material pozolânico					Risco 2. Cura lenta	Risco 2. Cura lenta	
Probabilidade de falhas	2	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente	2	2	Inexistente

Fonte: Elaborado pelo autor

Cimento CP IV – Fator de risco associado à sua composição química e sua utilização; cimento Portland pozolânico, tem em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico. Por isso, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos.

Tabela 59 Análise *Swot* Cimento LC³

	Propriedades físicas do material					Propriedades mecânicas do componente		
	Composição física	Granulometria	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Resistência à tração	Resistência à compressão	Absorção
Substituinte (Cimento LC ³)	Risco 1. Mistura ternária de clínquer em 55%, argila calcinada 30% e filler calcário 15%	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco inexistente	Risco 1. Concreto em fase de estudos	Risco 1. Concreto em fase de estudos	Risco 1. Concreto em fase de estudos
Probabilidade de falhas	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Cimento LC³- Fator de risco associado a sua composição química e grau de impacto ambiental, mistura ternária de clínquer em 55%, argila calcinada 30% e filler calcário 15%; o cimento LC³ produzido para o estudo será composto por 55% de CPV, 30% de argila calcinada e 15% de filler calcário, cimento em fase de estudos no Brasil.

O cimento LC³ é composto por 55% de clínquer; este aglomerante, por conter em maior concentração o clínquer, torna-o mais indicado para produção de artefatos de concreto, podendo apresentar uma cura de rápida a moderada.

A dosagem e produção do bloco de pavimento intertravado de concreto são fatores preponderantes na atribuição do grau de risco associado aos materiais estudados. A relação a/c na mistura dos materiais é relativamente baixa, e a consolidação da mistura na forma do bloco de pavimento se dá pela compactação mecânica. A produção do bloco de pavimento intertravado de concreto é industrial, necessitando de uma cura acelerada.

O grau de risco associado a cada material substituinte teve como comparativo os de referência, e uma análise refinada daqueles que podem ameaçar o desempenho mecânico do bloco de pavimento intertravado de concreto, informações inseridas nas Tabelas 53 a 59 Análise *Swot* para uma possível produção dos blocos com os materiais substituintes.

Com base nas informações inseridas na Análise *Swot*, é atribuído um grau de risco associado para os materiais substituintes em: inexistente, baixo, moderado, alto e grave; quanto mais alto o grau de risco associado na sua pontuação total, maior o risco e maiores as chances de falhas na produção do bloco. A Tabela 60 apresenta o grau de risco associado e sua quantidade de riscos correspondente, conforme metodologia ADAMC.

Tabela 60 Grau de risco associado

0 Risco	Inexistente
1 a 5 Riscos	Baixo
6 a 10 Riscos	Moderado
11 a 15 Riscos	Alto
16 ou + Riscos	Grave

Fonte: Elaborado pelo autor

A determinação do risco associado aos materiais é uma atividade baseada em critérios técnicos, norteadas pelas propriedades físicas dos materiais e propriedades mecânicas. A estrutura analítica de risco conforme Figura 54 apresenta cada categoria técnica e parâmetros de qualidade necessário aos materiais substituintes em estudo.

A Tabela 61 apresenta os riscos associados a cada material analisado, dando uma quantidade de riscos para cada propriedade requisitada de forma a gerenciá-los diferenciadamente.

Tabela 61 Matriz de risco dos materiais substituintes

		Agregado miúdo		Agregado graúdo	Aglomerante			
		Areia RCD	Areia Britada	Pedrisco ACR	Cimento CP II - E	Cimento CP III	Cimento CP IV	Cimento LC ³
Propriedades físicas dos materiais	Composição física	3	1	1	1	2	2	1
	Granulometria	1	1	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente
	Massa específica	1	1	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente
	Massa unitária	1	1	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente
	Absorção de água	1	1	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Propriedades mecânicas do componente	Resistência à tração	3	1	1	2	2	2	1
	Resistência à compressão	3	1	1	2	2	2	1
	Absorção	4	2	1	Inexistente	Inexistente	Inexistente	1
Grau de risco associado		17	9	8	5	6	6	4
		Grave	Moderado	Moderado	Baixo	Moderado	Moderado	Baixo

Fonte: Elaborado pelo autor

A matriz de risco apresenta os materiais substituintes com menor possibilidades de falhas, e maior possibilidade de sucesso para a produção do bloco com os materiais substituintes. A probabilidade de falhas é definida pela quantidade de riscos, e o critério de escolha dos materiais substituintes será seu nível de risco associado, ou a menor quantidade de risco.

Conforme o risco atribuído para cada categoria na matriz de risco, a Areia RCD como possível substituinte do agregado miúdo foi descartada devido ao alto grau de risco, apresentando 17 possibilidades de falhas com grau de risco associado em grave; já a Areia britada apresentou grau de risco moderado, podendo ser indicada para a Etapa 7 da metodologia ADAMC. O material substituinte para o agregado graúdo, Pedrisco ARC, apresentou grau de risco associado moderado, podendo ser indicado para a Etapa 7 da metodologia ADAMC.

Os materiais substituintes do aglomerante, Cimento CP II-E e Cimento LC³ apresentaram grau de risco associado em baixo, e serão indicados para a Etapa 7 da metodologia ADAMC. O Cimento CP-III e o Cimento CP-IV serão descartados por apresentar maior possibilidade de falha dentre os aglomerantes avaliados.

A matriz de risco permitiu descartar 3 dos 7 materiais substituintes levantados inicialmente, todas com grande possibilidade de atribuírem resultados negativos na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto.

A areia britada, pedrisco ARC, cimento CII-E e o cimento LC³ apresentam possibilidade de ganhos ambientais, relacionados a menores quantidades de emissões de dióxido de carbono CO₂ e consumo de energia incorporada EI, e também criam a possibilidade de que o bloco de pavimento intertravado de concreto atenda a todas as exigências técnicas referentes às propriedades físico-mecânicas desejadas.

4.7 ETAPA 7 – CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL

Como resultado da Etapa 6, temos os materiais que apresentaram ganhos ambientais e menor possibilidades de falhas para a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto.

Apresentam-se reduções das emissões de dióxido de carbono CO₂ lançados na atmosfera e uma redução do consumo de energia incorporada EI na produção do bloco. A Tabela 62 apresenta o total de emissões, energia incorporada, fator de desempenho em emissões

F_{dCO_2} e fator de desempenho em energia incorporada F_{dEI} para os blocos com os materiais substituintes.

Tabela 62 Total das emissões CO₂ e energia incorporada EI para o bloco com materiais substituintes

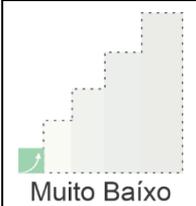
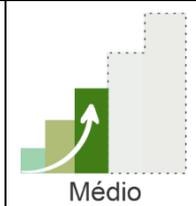
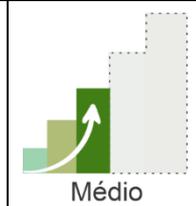
Blocos	(kgCO ₂ /m ²)	(MJ/m ²)	F_{dCO_2}	F_{dEI}
Bloco - A _{bt}	18,39	108,68	0,995	0,973
Bloco - P _{arc}	18,36	108,41	0,994	0,970
Bloco - CPIIE	14,47	88,05	0,783	0,788
Bloco - LC ³	11,61	93,07	0,628	0,833

Fonte: Elaborado pelo autor

Através do fator de desempenho em emissões F_{dCO_2} e fator de desempenho em energia incorporada F_{dEI} , definimos o índice de desempenho ambiental (*Ida*); o *Ida* apresenta de forma simples e clara a redução dos impactos ambientais alcançado, referentes aos indicadores de sustentabilidade avaliados. A metodologia ADAMC adota uma análise de equivalência. O *Ida* representa uma redução dos impactos ambientais: quanto maior o *Ida*, mais sustentável será a posposta.

Utilizando a Equação 5 encontramos o *Ida* para os Bloco-A_{bt}, Bloco-P_{arc}, Bloco-CPIIE e Bloco-LC³. O índice de desempenho ambiental é de 1,59% para o Bloco-A_{bt}, 1,79% para o Bloco-P_{arc}, 21,45% para o Bloco-CPIIE e 26,94% para o Bloco-LC³, referente à redução dos impactos ambientais relacionados a produção do bloco. A Tabela 63 apresenta os índices de desempenho ambiental e os níveis de performance ambiental alcançados.

Tabela 63 Nível da performance ambiental dos blocos com materiais substituintes

			
Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Médio
1,59%	1,79%	21,45%	26,94%
Bloco-A _{bt}	Bloco-P _{arc}	Bloco-CPIIE	Bloco-LC ³

Fonte: Elaborado pelo autor

Os estudos dos blocos com materiais substituintes apresentaram uma performance ambiental satisfatória, conforme a escala de desempenho ambiental proposto pela Metodologia ADAMC na Figura 34. Foi estabelecido o nível da performance ambiental dos blocos em muito baixo, muito baixo, médio e médio.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados aqui avaliados validam a metodologia ADAMC, seja em relação aos indicadores de sustentabilidade avaliados, à clareza da estrutura, dados disponibilizados, e também para avaliar os resultados obtidos.

Também avaliamos a redução dos impactos ambientais na fonte, por meio do aprimoramento tecnológico e material, associado ao emprego de tecnologias ou recursos considerados mais limpos. Este mecanismo é a forma mais legítima e efetiva para mitigar os fenômenos ambientais relacionados ao aquecimento global.

5.1 MELHORIA AMBIENTAL NO BLOCO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

Como resultado da aplicação da metodologia ADAMC, temos o bloco de pavimento intertravado de concreto com melhorias ambientais em relação ao bloco de referência, apresentando uma redução para os indicadores de sustentabilidade avaliados. Esta redução pode ser mensurada em índice de desempenho ambiental para as emissões CO₂ e consumo de energia incorporada na produção do bloco.

O índice de desempenho ambiental (*Ida*) atribuído pela metodologia ADAMC pode ser classificado em cinco categorias de performance ambiental como: muito baixo, baixo, médio, alto e avançado. Este nível de performance ambiental é resultado da redução de seus impactos ambientais, relacionados aos seus indicadores de sustentabilidade.

5.1.1 Índice de desempenho ambiental (*Ida*)

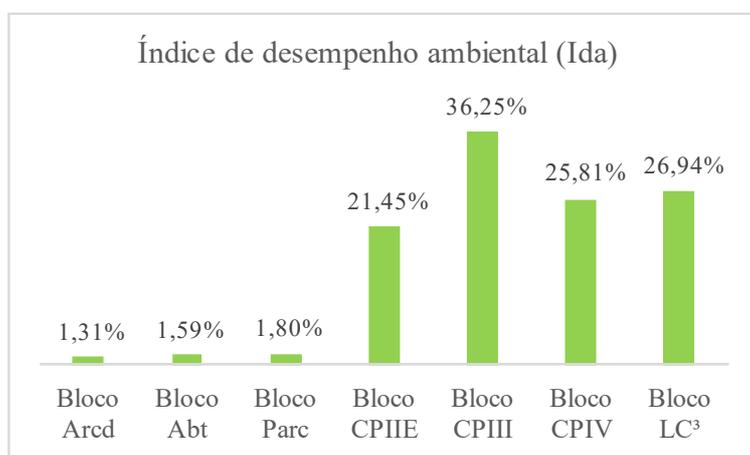
Como resultado do bloco com melhorias ambientais apresentado pela metodologia ADAMC, é possível realizar um comparativo do índice de desempenho ambiental atribuído aos blocos com os materiais substituintes.

O índice de desempenho ambiental atribuído aos blocos representa uma redução de seus impactos ambientais; esta redução é dada em porcentagem: quanto maior a porcentagem maior será o ganho ambiental. Todos os materiais substituintes levantados como ações para melhorias ambientais apresentam uma redução de seus indicadores de sustentabilidade, como emissões CO₂ e energia incorporada, comparadas ao bloco de referência.

Essa análise comparativa do Ida para os blocos com os materiais substituintes possibilita demonstrar o potencial que cada material possui isoladamente, e também uma avaliação para uma possível interação entre esses materiais, almejando uma maior redução dos impactos ambientais relacionados aos seus indicadores de sustentabilidade como as emissões CO₂ e energia incorporada.

Para esta análise comparativa foram considerados apenas os ganhos ambientais relacionados às reduções de seus indicadores de sustentabilidade avaliados. A Figura 55 apresenta o Ida dos blocos com melhorias ambientais, comparando o ganho ambiental na substituição de um de seus materiais integrantes.

Figura 55 Análise comparativa do Ida para os blocos com materiais substituintes



Fonte: Elaborado pelo autor

O bloco-A_{rcd} obteve uma redução de 1,31% para o índice de desempenho ambiental, porém este material foi descartado na Etapa 6, por apresentar alto grau de risco associado à sua produção. Os blocos-A_{bt} e bloco-P_{arc} obtiveram uma redução de 1,59% e 1,80% para o índice de desempenho ambiental.

Já os blocos-CPIIE, bloco-CPIII, bloco-CPIV e bloco-LC³ obtiveram reduções satisfatórias de 21,45%, 36,25%, 25,81%, e 26,94% para o índice de desempenho ambiental, porém o bloco-CPIII e o bloco-CPIV foram descartados na Etapa 6, por apresentar alto grau de risco associado ao bloco produzido em prensa.

A Metodologia ADAMC proporcionou uma análise ambiental de materiais substituintes, para o bloco de pavimento intertravado, direcionando a uma redução de suas emissões CO₂ e consumo de energia incorporada; esta redução do impacto negativo sobre o meio ambiente reflete sua melhoria ambiental. O índice de desempenho ambiental “Ida”

quantifica a redução alcançada através de uma percentagem em comparação ao bloco de referência.

O índice de desempenho ambiental mensura de forma quantitativa a redução dos impactos ambientais, servindo de parâmetro para avaliar a performance ambiental em níveis de desempenho ambiental.

5.1.2 Performance ambiental

Avaliando a performance ambiental, podemos classificar os blocos em cinco categorias de nível de performance ambiental em: muito baixa, baixa, média, alta e avançada. A Metodologia ADAMC adota uma representação gráfica associada também a uma escala de cores e número de barras escalonadas para representar o nível de desempenho ambiental para os componentes construtivos.

A performance ambiental classifica o índice de desempenho ambiental em níveis de performance; cada nível corresponde a intervalos de desempenho que estabelece uma escala gráfica de desempenho ambiental desenvolvido pela Metodologia ADAMC. Estes intervalos quantificam a redução do impacto ao meio ambiente, alcançado pela melhoria ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto.

A partir da redução dos impactos ambientais dados em percentagem, retratados pelo índice de desempenho ambiental I_{da} e aplicados à escala gráfica da Figura 33, é determinado o nível de performance ambiental para cada bloco com materiais substituintes. A Tabela 64 apresenta os níveis de performance ambiental atribuído a cada um dos blocos com melhorias ambientais.

Tabela 64 Nível de performance ambiental dos blocos

Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Alto	Médio	Médio
1,31%	1,59%	1,80%	21,45%	36,25%	25,81%	26,94%
Bloco - A_{red}	Blocos - A_{bt}	Bloco - P_{arc}	Blocos CPIIE	Bloco CPIII	Bloco CPIV	Bloco LC ³

Fonte: Elaborado pelo autor

O nível de performance ambiental atribuído pela metodologia ADAMC permite uma análise visual de fácil compreensão dos resultados, associada a uma identidade visual, representando gradativamente o aumento do desempenho ambiental, para que desta maneira os resultados sejam expressos de forma intuitiva e compreensível.

Os Bloco-A_{red}, Blocos-A_{bt} e Bloco-A_{arc} receberam o nível de performance ambiental muito baixo, os blocos Bloco-CPIIE, Bloco-CPIV e Bloco-LC³ receberam o nível de performance ambiental médio. Já o Bloco-CPIII recebeu o nível de desempenho ambiental alto.

O Bloco-LC³ apresentou um ganho ambiental de 26,94% de redução dos impactos ambientais e sua composição é formada por uma mistura ternária de clínquer em 55%, argila calcinada variando de 30% e filler calcário 15%; este aglomerante, por conter em maior concentração o clínquer, torna-o mais indicado para produção de artefatos de concreto.

Podemos observar que o bloco-CPIII apresentou o maior ganho ambiental 36,25% de redução dos impactos ambientais, porém este aglomerante é composto por 35% a 70% de escória de alto-forno; esta composição o torna impróprio para a produção de artefatos de concreto devido a seu baixo calor de hidratação, cura prolongada e ser usado em concretos trabalháveis, ou seja, concreto com alta relação água cimento. Este concreto é muito utilizado para moldagem no local utilizando formas ou caixarias.

Outro ponto importante a ser citado é a fabricação de artefatos de concreto por formas plásticas; essa prática é utilizada por pequenas fabricas devido a sua pequena tiragem, devido à demora na cura das peças de concreto. Esse modelo de fabricação utiliza o concreto trabalhável com alta a/c, utilizando os cimentos CPII, CPIII e CPIV.

5.2 REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

A metodologia ADAMC possibilitou a avaliação da substituição de materiais com menores cargas ambientais, para a produção de bloco de pavimento intertravado de concreto, com melhorias ambientais e menor impacto sobre o meio ambiente.

Com o propósito de alcançar uma redução mais significativas para o bloco, foram avaliadas as melhorias ambientais alcançada pela substituição combinada dos materiais substituintes para o bloco com melhorias ambientais.

Foram avaliados os resultados da substituição combinada destes materiais que apresentaram menor carga ambiental em emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI, levantados pela Metodologia ADAMC.

Esta interação combinada entre os materiais possibilitou avaliar a máxima eficácia ambiental para o estudo, o limite máximo alcançado para a redução dos impactos ambientais em emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI.

Outro ponto importante a ser mencionado para a redução dos impactos ambientais é o potencial de carbonatação do componente de concreto, ou seja, é um processo de captura de CO₂ da atmosfera devido à carbonatação do concreto, gerando o carbonato de cálcio (CaCO₃), que aprisiona o dióxido de carbono na estrutura de concreto, em um processo inverso ao de produção do cimento.

Estudos estimaram que 11% do CO₂ emitido na produção do cimento é reabsorvido pelo concreto devido à carbonatação durante sua vida útil. Este processo de captura de CO₂ não foi considerado para a redução dos impactos ambientais avaliados por este estudo.

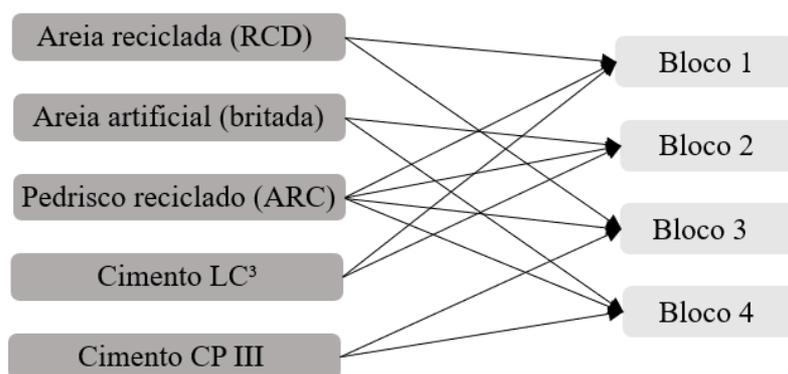
5.2.1 Máxima eficácia ambiental

A máxima eficácia ambiental tem como finalidade obter o maior aproveitamento ambiental possível, o limite máximo alcançado para o desempenho ambiental no bloco; apresenta também oportunidades para uma nova fase do estudo. Aqui é apresentado o marco zero (bloco referência) e o bloco com a máxima eficácia ambiental.

Com objetivo de alcançar a máxima eficácia ambiental foi realizada a interação entre os materiais substituintes como: areia reciclada (RCD), areia artificial (britada), pedrisco reciclado (ARC), cimento CP III e cimento LC³ para a produção do bloco com a máxima eficácia ambiental.

Foi realizada a avaliação do bloco de pavimento intertravado de concreto com diferentes substituições de seus componentes integrantes. A Figura 56 apresenta a interação entre os materiais substituintes.

Figura 56 Interações entre os materiais substituintes para a definição dos blocos de análise



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a primeira interação temos o Bloco 1 ($A_{\text{rcd}}+P_{\text{acr}}+LC^3$) com a substituição da areia natural, pedrisco e cimento CPV, por areia de RCD, Pedrisco de ARC e cimento LC^3 .

Na segunda interação temos o Bloco 2 ($A_{\text{bt}}+P_{\text{acr}}+LC^3$) com a substituição da areia natural, pedrisco e cimento CPV, por areia britada, Pedrisco de ARC e cimento LC^3 .

Para a terceira interação temos o Bloco 3 ($A_{\text{rcd}}+P_{\text{acr}}+CPIII$) com a substituição da areia natural, pedrisco e cimento CPV, por areia RCD, Pedrisco de ARC e cimento CPIII.

Já a quarta interação temos o Bloco 4 ($A_{\text{bt}}+P_{\text{acr}}+CPIII$) com a substituição da areia natural, pedrisco e cimento CPV, por areia britada, Pedrisco de ARC e cimento CPIII. Esses quatro modelos foram comparados ao bloco de pavimento intertravado de concreto referência.

A Tabela 65 demonstra as quantidades de emissões de dióxido de carbono CO_2 e energia incorporada EI, fator de desempenho em emissões e fator de desempenho em energia incorporada dos blocos estudados, demonstrando o índice de desempenho ambiental

Tabela 65 Total das emissões CO_2 e energia incorporada dos blocos de análise

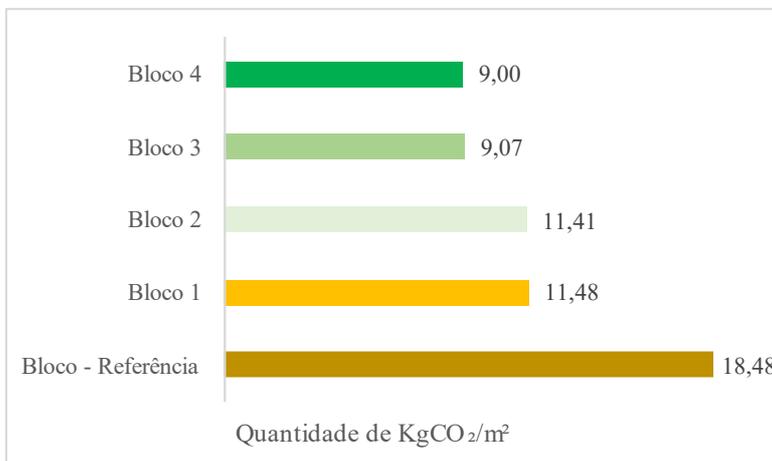
Blocos de análise	($kgCO_2/m^2$)	(MJ/m^2)	F_{aco_2}	F_{dEI}	<i>Ida</i>
Bloco 1	86,88	11,48	0,77	0,62	30,05%
Bloco 2	86,72	11,41	0,77	0,61	30,33%
Bloco 3	80,63	9,07	0,72	0,49	39,36%
Bloco 4	80,46	9,00	0,72	0,48	39,64%

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 57, a Figura 58, a Tabela 66 e a Tabela 67 demonstram os resultados encontrados pela substituições dos materiais originais (areia natural, pedrisco britado e cimento CPV), por substituintes (areia britada, areia de RCD, pedrisco de ARC, cimento CPII e cimento

LC³), com objetivo de avaliar a redução de emissões CO₂ e energia incorporada, na produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, identificando ganhos ambientais relacionados a essas quantidades.

Figura 57 Comparativo da quantidade de emissões de CO₂ dos blocos 1, 2, 3, 4 e referência



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 66 Redução das emissões dos blocos 1, 2, 3 e 4

Blocos de análise	Redução kgCO ₂ /m ²
Bloco 1	37,87%
Bloco 2	38,25%
Bloco 3	50,91%
Bloco 4	51,29%

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando o bloco referência com 18,48 kgCO₂/m² e o bloco 1 com 11,48 kgCO₂/m², temos uma redução de 37,87% de emissões de CO₂. Para o bloco 2 com 11,41 kgCO₂/m², temos uma redução de 38,25% de emissões de CO₂. Para o bloco 3 com 9,07 kgCO₂/m², temos uma redução de 50,91% de emissões de CO₂. Já para o bloco 4 com 9,00 kgCO₂/m², temos uma redução de 51,29% de emissões CO₂, como demonstra a Tabela 66.

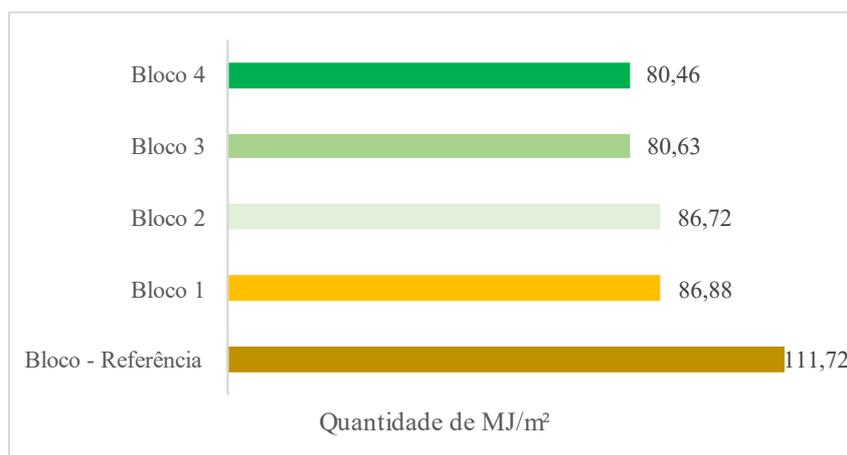
Tabela 67 Redução da energia incorporada dos blocos 1, 2, 3 e 4

Blocos de análise	Redução da energia incorporada
Bloco 1	22,23%
Bloco 2	22,37%
Bloco 3	27,82%
Bloco 4	27,98%

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando o bloco referência com 111,72 MJ/m² e o bloco 1 com 86,88 MJ/m², temos uma redução de 22,23% de energia incorporada. Para o bloco 2 com 86,72 MJ/m², temos uma redução de 22,37% de energia incorporada. Para o bloco 3 com 80,63 MJ/m², temos uma redução de 27,82% de energia incorporada. Já para o bloco 4 com 80,46 MJ/m², temos uma redução de 27,98% de energia incorporada, como demonstra a Tabela 67.

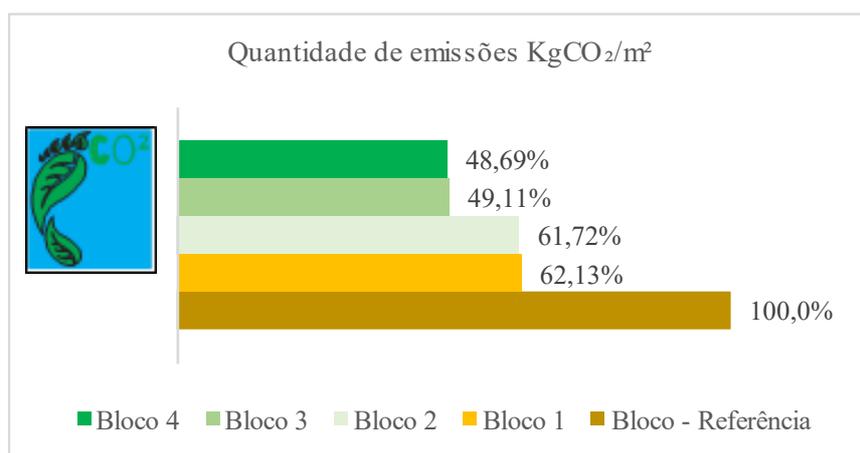
Figura 58 Comparativo da quantidade de energia incorporada dos blocos 1, 2, 3, 4 e referência



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 59 e a Figura 60 apresentam o percentual de emissões CO₂ e energia incorporada que cada bloco com melhorias ambientais produz em relação ao bloco de referência.

Figura 59 Porcentagem de emissões de kgCO₂/m² dos blocos 1, 2, 3 e 4 em relação ao bloco referência



Fonte: Elaborado pelo autor

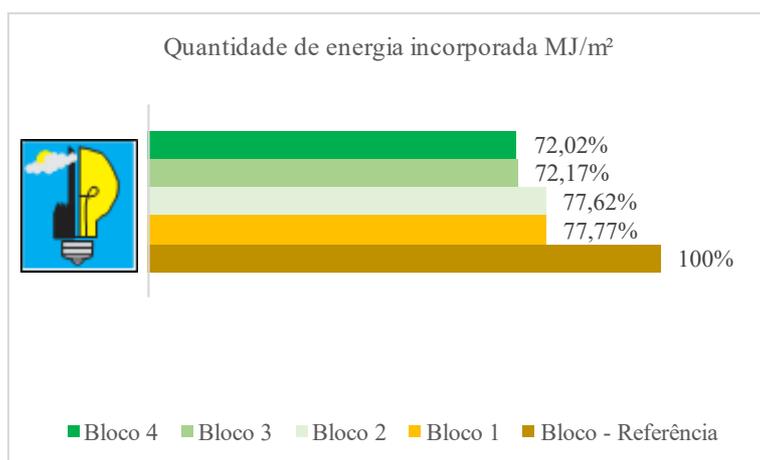
Para a produção de 1 m² de bloco, comparando o bloco referência e o bloco 4, temos uma emissão de 48,69% de CO₂ em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 51,31%, ou cerca de 9,48 kgCO₂/m². Já comparando o bloco referência e o

bloco 3, temos uma emissão de 49,11% de CO₂ em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 50,89% ou cerca de 9,41 kgCO₂/m².

Comparando o bloco referência e o bloco 2, temos uma emissão de 61,72% de CO₂ em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 38,28% ou cerca de 7,07 kgCO₂/m². Já comparando o bloco referência e o bloco 4, temos uma emissão de 62,13% de CO₂ em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 37,87% ou cerca de 7,00 kgCO₂/m².

A Figura 60 apresenta a quantidade de energia incorporada dos blocos com melhorias ambientais em comparação ao bloco referência. Para a produção de 1 m² do bloco 4 consumindo 72,02% de energia incorporada em relação ao bloco de referência, uma redução de 27,98% ou cerca de 31,26 MJ/m².

Figura 60 Porcentagem de energia incorporada MJ/m² dos blocos 1, 2, 3 e 4 em relação ao bloco referência



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a produção de um m² de bloco, comparando o bloco referência e o bloco 4, temos um consumo de 72,02% de MJ/m² em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 27,98% do consumo de energia incorporada na produção do bloco ou cerca de 31,26 MJ/m² a menos na sua produção.

Já comparando o bloco referência e o bloco 3, temos um consumo de 72,17% de MJ/m² em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 27,83% do consumo de energia incorporada na produção do bloco ou cerca de 31,09 MJ/m² a menos na sua produção.

Comparando o bloco referência e o bloco 2, temos um consumo de 77,62% de MJ/m² em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 22,38% do consumo de energia incorporada na produção do bloco ou cerca de 25,00 MJ/m² a menos na sua produção.

Já comparando o bloco referência e o bloco 1, temos um consumo de 77,77% de MJ/m² em comparação a produção do pavimento referência, uma redução de 22,33% do consumo de energia incorporada na produção do bloco ou cerca de 24,84 MJ/m² a menos na sua produção.

O cimento CPV utilizado na fabricação de bloco de pavimento intertravado de concreto é o aglomerante produzido no Brasil com maior impacto sobre o meio ambiente, com fator de emissão de 799,5 kgCO₂/t e energia incorporada de 3366 MJ/t. Dentre os cimentos comercializados temos o CPE e CPIII que apresentam menores impactos sobre o meio ambiente; vale se ressaltar também o cimento LC³ que se encontra em fase de estudos. Porém, estudos recentes apontaram uma redução de cerca de 31% das emissões de CO₂ provenientes da fabricação do cimento LC³ em relação ao cimento Portland comum.

A menor carga ambiental do cimento LC³ e CPIII no processo de fabricação, referente a emissão de CO₂ e energia incorporada EI, reforça a necessidade da utilização de cimentos com menores impactos ambientais utilizados na construção civil. O LC³ desponta na atualidade como uma das mais promissoras opções de aglomerantes, por ser composto por volta de 30% de pozolana (argila calcinada), produzida da queima de argila, ponto importante pelo fato da argila ser um material abundante que está presente em quase todas as localidades; este aglomerante apresenta baixo teor de emissão de carbono.

A máxima eficácia ambiental foi alcançada pelo bloco 4 com redução de seus impactos ambientais relacionados as emissões de dióxido de carbono CO₂ e energia incorporada EI, apresentado um índice de desempenho ambiental em 39,64%.

A máxima eficácia ambiental representa o fato de chegarmos ao limite máximo permitido, levando em consideração os materiais estudados e informações, fato de esgotarmos todas as possibilidades de melhorias ambientais levantadas pela metodologia, relacionada ao objeto de estudo (bloco de pavimento intertravado de concreto).

5.2.2 Carbono equivalente CO₂eq

Objetivando o maior ganho ambiental, relacionado as emissões CO₂, o bloco 4 apresentou a máxima eficácia ambiental. Adotaremos o termo “Bloco-B_r” para o bloco de referência e “Bloco-B_{mx}” para o bloco 4 ($A_{bt}+P_{acr}+CPIII$) que obteve a máxima eficácia ambiental.

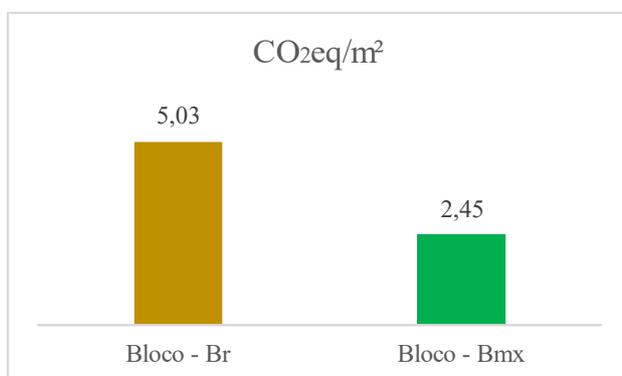
Os indicadores de sustentabilidade mais utilizados para avaliação de desempenho ambiental das edificações são relacionados ao aquecimento global, e podem ser mensurados a partir das emissões CO₂, para a obtenção do dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

O CO₂ equivalente ou CO₂eq significa “equivalente de dióxido de carbono”, e é uma medida internacionalmente padronizada de quantidade de gases de efeito estufa (GEE) como o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, enxofre, convertidos para CO₂eq.

A conversão dos gases de efeito estufa (GEE) em dióxido de carbono (CO₂), isto é, para a conversão do dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), deve levar em consideração o Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês Global Warming Potential).

Desta forma o GWP dos GEEs está relacionado com a capacidade do dióxido de carbono em absorver calor na atmosfera durante um determinado período; a molécula de dióxido de carbono sempre terá índice de GWP igual a 1, ou seja, 1 kg de CO₂ equivale a 0,2727 kg de carbono equivalente CO₂eq, já que é considerado apenas a massa das moléculas de carbono em um quilo de CO₂. Nesse sentido, esta capacidade absorver calor na atmosfera é comparada à mesma capacidade de absorção de calor por parte do dióxido de carbono. A Figura 61 demonstra CO₂eq do bloco-B_r e bloco-B_{mx}.

Figura 61 Dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) dos blocos



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando os resultados para o dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), para o bloco- B_r e bloco- B_{mx} , temos uma taxa de emissões da ordem de $5,03 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ e $2,45 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$. Podemos observar uma redução de 51,29% do potencial de aquecimento global para o bloco- B_{mx} , bloco com máxima eficácia ambiental, como demonstra a Figura 61.

5.3 COMPENSAÇÃO AMBIENTAL

A indústria da construção civil lança em média $229 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ na atmosfera, e uma forma de redução efetiva destas emissões CO_2 é realizar estudos metodológicos com objetivo de repensar o processo, analisar e avaliar o ciclo de vida do produto, objetivando melhorias ambientais como substituição de insumos, materiais ou processos que apresentem menores cargas ambientais, reduzindo a quantidade de emissões CO_2 lançadas na atmosfera.

A neutralização de carbono pode ser realizada por meio do plantio de árvores de reflorestamento ou pela compra de créditos de carbonos. No primeiro caso, o mais comum, calculamos o número de árvores que devem ser plantadas para fazer a compensação do carbono ou sequestro de carbono.

A compensação dessas emissões pode ser realizada como forma paliativa, e o projeto de plantar árvores deve ser o último passo do processo. Primeiro é necessário mudar de atitude e reduzir, e muito, as emissões de CO_2 . No entanto, é essencial que se pense no plantio de árvores como alternativa de compensar as emissões de gases de efeito estufa, depois de realizar todas as possibilidades de redução efetiva de emissões dos GEE.

5.3.1 Compensação das emissões de dióxido de carbono CO_2

As plantas atuam como sequestradoras de carbono, capturando CO_2 da atmosfera para geração de energia que será usada em seu crescimento. O sequestro de carbono constitui, em outras palavras, o processo de crescimento das plantas; quanto maior é o porte das árvores, mais biomassa se acumula, e conseqüentemente mais carbono é fixado, sendo as árvores responsáveis por sequestrar grande parte das emissões CO_2 lançadas na atmosfera.

Adotaremos o termo “Bloco- B_r ” para o bloco de referência e “Bloco- B_{mx} ” para o bloco 4 que obteve a máxima eficácia ambiental. Os estudos demonstraram que a produção deste

Bloco-B_{mx} com a máxima eficácia ambiental deixaria de lançar 9,48 kgCO₂/m² de dióxido de carbono na atmosfera em comparação ao bloco-B_r.

Para promover a compensação do CO₂ emitido na atmosfera pela produção do bloco de pavimento intertravado de concreto no estudo foi utilizada a Equação 6, baseada nos estudos de Nunes et al. (2012), nos quais é realizado o levantamento da quantidade de mudas a serem plantadas para a compensação por sequestro de carbono.

$$\sum \text{emissões} / \text{Seq. árvore} = \text{Total de árvores} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

\sum emissões: Somatória das emissões CO₂ na atmosfera em kgCO₂.

Seq. Árvore: Capacidade de sequestro que uma árvore pode retirar de kgCO₂ da atmosfera no período de 20 anos.

Total de árvore: Quantidade de árvores a serem plantadas para realizar a compensação através do sequestro de carbono.

Pesquisas apresentam uma média de 184,24 kg de dióxido de carbono que uma árvore pode retirar da atmosfera ao longo de seus primeiros 20 anos, período estimado em estudos. A Tabela 68 apresenta a quantidade de emissões de dióxido de carbono CO₂ para (unid.) e (m²) do Bloco-B_r e Bloco-B_{mx} e suas respectivas compensações através do plantio de árvores como pinus ou eucalipto.

Tabela 68 Compensação do CO₂ através do plantio de árvores

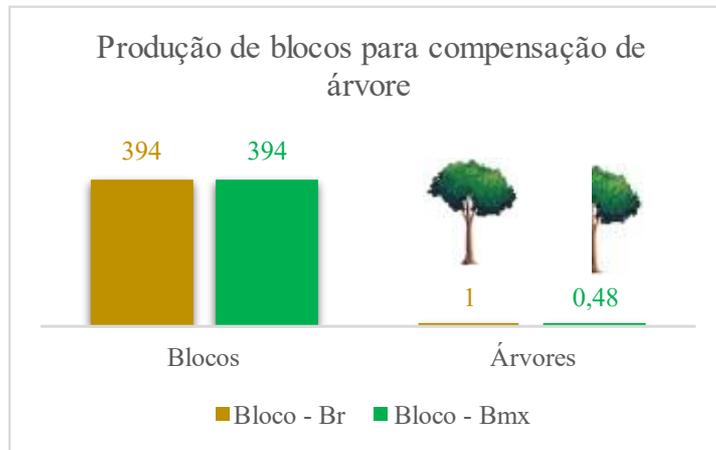
Tipo de Bloco	Área unitária (m ²)	Emissão unitária kgCO ₂	Emissão (m ²) kgCO ₂	Redução de emissões (B _r /B _{mx})	Compensação/1000 m ²
Bloco-B _r	0,023	0,47	18,48	51,29%	100 árvores
Bloco-B _{mx}	0,023	0,23	9,00		48,9 árvores

Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação às estimativas do potencial de emissões de carbono evitado, chegou-se a uma redução de 51,29% da emissão de gases de efeito estufa GEEs. Dessa forma, para cada 394 unidades de bloco-B_r produzidos, seria necessário o plantio de 1 árvore de reflorestamento. Já para a produção do bloco-B_{mx}, a cada 394 unidades seria necessário o

plantio de 0,48 árvore de reflorestamento, um ganho de 0,52 árvore/m². A Figura 62 demonstra uma análise comparativa na produção dos blocos.

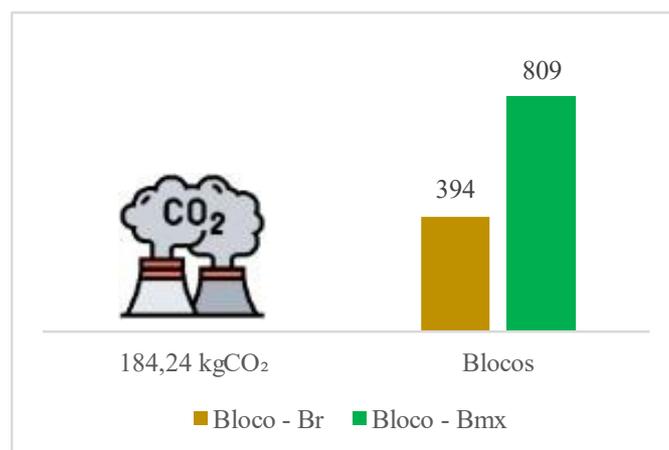
Figura 62 Análise comparativa da produção de bloco por plantio de árvores



Fonte: Elaborado pelo autor

Outra comparação pode ser feita por quantidade de emissões: a cada 184,24 kg de dióxido de carbono lançados na atmosfera teremos que plantar uma árvore de reflorestamento; avaliando a produção entre os dois blocos temos a seguinte reflexão, teremos um total de 394 unidades de bloco-Br e 809 unidades do bloco-B_{mx} produzidos, com o mesmo impacto ao meio ambiente, um ganho de 10,43 m² ou 415 blocos a mais com a mesma quantidade de emissões CO₂. A Figura 63 demonstra uma análise comparativa das emissões CO₂ para a produção de bloco-Br e bloco-B_{mx}.

Figura 63 Análise comparativa das emissões CO₂ por produção de blocos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Levando em consideração a produção industrial que uma máquina de prensa de pré-moldados pode produzir, chegando a 3.450 unid./h, 27.600 unid./dia, 552.000 unid./mês

ou 13.974 m²/mês de bloco-A_{mx}, e considerando apenas umas das quatro prensas de bloco de pavimento utilizadas na fábrica, a mesma deixaria de emitir 132 tCO₂/mês e de consumir 436 TJ/mês em comparação ao bloco-B_r.

Tendo como base a média de 184,24 kg de dióxido de carbono que uma árvore pode retirar da atmosfera ao longo de seus primeiros 20 anos, evitamos plantar 683 árvores de reflorestamento como compensação pelas emissões CO₂ que se evitou lançar na atmosfera pela produção de 1 mês do bloco-B_{mx}.

Contudo, há que se observar que a remoção do carbono da atmosfera e sua reincorporação na forma de biomassa só acontece enquanto as plantas estão crescendo. O reflorestamento contribui, portanto, apenas temporariamente para a estabilização das concentrações atmosféricas de carbono. Após esse período, as árvores de reflorestamento deverão ser repostas, cortadas para se iniciar um novo ciclo de sequestro de carbono, para que não haja nova liberação de carbono na atmosfera.

Há soluções possíveis para esses problemas como o reflorestamento de áreas degradadas, matas ciliares ao longo de rios, que podem ser recuperadas com espécies nativas, formando corredores de biodiversidade considerados áreas de preservação permanente (APP).

Os estudos levantados demonstram que a etapa de plantar árvores deve ser o último passo do processo. Primeiro precisamos reduzir as emissões CO₂, através de estudos mais aprofundados e amparados cientificamente como demonstra a Metodologia ADAMC. Portanto, é essencial que só pensemos no plantio de árvores como alternativa de compensar as emissões de gases poluentes depois de termos realizado todas as possibilidades de redução efetiva destas emissões CO₂.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES

A indústria da construção civil é um dos principais setores que induz diversos impactos ambientais ao longo das atividades em sociedade, desde a própria extração de recursos naturais até a geração de resíduos resultantes de suas operações. Neste contexto, compreende-se a importância da sustentabilidade não só no setor econômico-social relativo ao ambiente construído, mas também a toda atividade humana.

As construções sustentáveis resultam desse raciocínio e têm sua essência na implementação e estruturação do ambiente construído com maior eficiência, com objetivo de mitigar os impactos ambientais que advêm das construções e de todos os seus respectivos processos.

Os materiais e componentes construtivos se relacionam com a maioria dos impactos ambientais causados pela construção, tendo em conta o consumo inerente ao seu processo de extração, produção, transporte, construção, uso, demolição e reciclagem. Assim, as ferramentas para uma construção mais sustentável fomentam uma possível redução destes impactos ambientais.

A hipótese levantada inicialmente para a elaboração de uma metodologia para avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos mostrou-se adequada. A aplicabilidade e o resultado esperado pela metodologia ADAMC foi confirmada ao avaliar a performance ambiental do bloco de pavimento intertravado de concreto com melhorias ambientais.

No decorrer da pesquisa foram apresentados conceitos, definições e informações que contribuíram para o entendimento da sustentabilidade no ambiente construído, e o processo para mitigar os impactos ambientais provocados pela construção.

Como critérios de avaliação do desempenho ambiental, foram estabelecidos indicadores de sustentabilidade em emissões CO₂ e energia incorporada, e também foi estabelecido um fator de desempenho (*fd*) o qual permitiu uma comparação direta e equivalente dos parâmetros avaliados.

Quanto à estrutura da metodologia ADAMC, é possível notar que foi constituída por etapas consideradas sequenciais e suficientes para a concretização da pesquisa. Desta forma os objetivos foram alcançados, avaliando os indicadores de sustentabilidade preestabelecidos e posteriormente relacionados a critérios almejados; com a estrutura definida, o instrumento foi desenvolvido e testado.

Como resultado da aplicação da metodologia ADAMC, foi alcançada uma redução dos impactos ambientais para os indicadores de sustentabilidade avaliados. A estrutura da metodologia ADAMC foi pensada para avaliar o desempenho ambiental de materiais e componentes construtivos; contudo, também é possível avaliar fases ou processo dos materiais ou componentes caso necessário.

A metodologia ADAMC possibilitou mensurar os indicadores de sustentabilidade ambiental, e avaliar a possibilidade de mitigar seus impactos ambientais. A metodologia demonstrou a viabilidade de redução de 51,29 % dos impactos ambientais, relacionados às emissões CO₂ de dióxido de carbono, e, uma redução de 27,98 % de energia incorpora, para a produção de 1 m² de Bloco 4.

A aplicação da metodologia ADAMC em outros componentes construtivos ou materiais, avaliando outros indicadores de sustentabilidade, pode contribuir e muito com a pegada ambiental.

Como contribuições desta metodologia, acredita-se que benefícios significativos serão proporcionados aos construtores, projetistas e *stakeholders*, por ser um caminho que direciona à compreensão do desempenho ambiental direcionado aos materiais de construção. Em paralelo, é um instrumento considerado de interesse para as tarefas do ensino e da educação. Além disso, poderá cooperar para os avanços no processo de projeto, com a melhoria dos padrões de sustentabilidade das edificações e de materiais construtivos.

O índice de desempenho ambiental (*Ida*) permite uma análise e classificação em cinco níveis de performance ambiental. A escala para a performance ambiental proposta pela metodologia ADAMC permite uma rápida classificação do nível de performance ambiental, por meio de intervalos de desempenho ambiental preestabelecidos.

A metodologia ADAMC, pode se tornar um instrumento de referência aos projetistas que desejam ou necessitam especificar os materiais, ou propor materiais com menor carga ambiental e maior sustentabilidade. Em uma perspectiva mais científica, a contribuição consiste em demonstrar a importância de se considerar os pressupostos dos indicadores de sustentabilidade na seleção dos materiais construtivos.

As informações técnicas necessárias e de fácil acesso sobre os indicadores de sustentabilidade ambiental dos materiais ou componentes utilizados na construção civil podem vir a ampliar a visão dos projetistas, construtores e usuários, levando-os a indicarem e exigirem materiais com menores cargas ambientais e que degradem cada vez menos o meio ambiente.

Atualmente o uso de indicadores de sustentabilidade para a escolha ou indicação de materiais construtivos tem a força necessária para impactar a viabilidade de um projeto sustentável, devido ao alto custo das tecnologias e logística aplicadas.

Somado ao desconhecimento do conceito de sustentabilidade do ambiente construído pelos consumidores em sua maioria, e também pela ausência de critérios sistematizados e preestabelecidos como indicadores de sustentabilidade no ambiente construído, se estabelece uma barreira a ser ultrapassada.

O estudo demonstrou a complexidade do conceito de sustentabilidade. Concluímos que a sustentabilidade não é permanente, e tem relação direta com o seu ponto de referência (*benchmark*); esse conceito é transitório devido aos avanços tecnológicos, e permanece em constante transformação desde a sua criação ou implementação.

Os padrões adotados hoje para análise do ponto de referência (*benchmark*) não serão os mesmos de amanhã; esse conceito deve estar sempre em evolução e adaptando-se às mudanças e necessidades dos usuários e da tecnologia.

Dessa forma, pesquisas devem ser desenvolvidas e estruturadas para uma melhor compreensão e adaptação para as incertezas que virão, de modo a mensurar os impactos das atividades sobre o meio ambiente, avaliando as atividades do passado e do presente para atingir metas futuras.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à complexidade do tema e às dificuldades encontradas pela pesquisa, recomendam-se algumas temáticas que podem ser abordadas em futuros trabalhos relacionados à metodologia ADAMC e também à avaliação do desempenho ambiental de materiais construtivos:

1. Analisar as propriedades físico-mecânicas do material com melhorias ambientais, desta forma validando a possibilidade de utilização do material ou componente pela construção civil;
2. Aplicar a metodologia ADAMC a outros materiais ou componentes construtivos;
3. Desenvolver uma declaração ambiental de produto DAP para a metodologia ADAMC;
4. Adaptar a metodologia ADAMC para avaliação do desempenho ambiental de edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. 1ª edição ed. São Paulo - SP: [s. n.], 2010. *E-book*.

ABDALLAH, Mohamed; ELFEKY, Amal. Impact of waste processing byproducts on the carbon footprint of integrated waste-to-energy strategies. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 280, n. December 2020, p. 111839, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111839>

ABNT NBR 15116. **Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2021.

ABNT NBR 15575-1. **Edifícios habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. [S. l.: s. n.]

ABNT NBR 15575-3. Edifícios habitacionais — Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. [S. l.], p. 52, 2013.

ABNT NBR 9781. **Peças de concreto - Especificação e método de ensaio**. Rio de Janeiro - RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ABNT NBR ISO 14040. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. [S. l.: s. n.]

ABNT NBR ISO 14044. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. [S. l.: s. n.] Disponível em: www.abnt.org.br

ABRECON. **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil**. [s. l.], 2011. Disponível em: <https://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil/>.

ACMRA. **Guidelines for recycled construction materia**. Austrin - Wien: AUSTRIAN CONSTRUCTION MATERIALS RECYCLING ASSOCIATION, 2004.

ALBERTE, Elaine Pinto Varela; HANDRO, Julia Barretto. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 305–320, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300553>

ALBUQUERQUE, Hiago Ribeiro; LIRA, Júlia; SPOSTO, Rosa Maria. Emissões de CO₂ de sistemas de revestimento de argamassa: estudo de caso de aplicação de argamassa projetada comparativamente à aplicação convencional. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 377–393, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400311>

ALMEIDA, Lidiane de Brito; COSTA, Dayana Bastos; ALBERTE, Elaine Pinto Varela. Proposta de sistema de indicadores de desempenho para gestão sustentável em canteiros de obras. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 153–170, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000100367>

ALVAREZ, Analia; RIPOLL MEYER, Verónica. Ciclo De Vida. Valoración De Materiales Constructivos En La Vivienda Social De Zonas Árido-Sísmicas. **Arquitecto**, [S. l.], n. 14, p. 24, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.30972/arq.0144147>

ANDREO-MARTÍNEZ, Pedro *et al.* A web application to estimate the carbon footprint of constructed wetlands. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 135, n. October 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104898>

ARRIGONI, Alessandro *et al.* Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 149, p. 1051–1061, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>

ASDRUBALI, F.; GRAZIESCHI, G. Life cycle assessment of energy efficient buildings. **Energy Reports**, [S. l.], v. 6, p. 270–285, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.144>

ASUS. . [s. l.], 2015. Disponível em: <https://asus.lpp.ufes.br/quemsomos>. Acesso em: 4 abr. 2022.

ATTIÉ, Deborah; SALGADO, Fernanda De Andrade. Avaliação do Ciclo de Vida na construção civil brasileira: análise de impactos ambientais. **Engineering Sciences**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 18–27, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/cbpc2318-3055.2021.001.0003>

AUGUSTO JUNIOR, José *et al.* ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE BLOS SEXTAVADOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTOCÇÃO COM USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **COLLOQUIUM EXACTARUM**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 65–76, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5747/ce.2017.v09.n2.e194>

AULICINO, Patricia. **Análise De Métodos De Avaliação De Sustentabilidade Do Ambiente Construído : O Caso Dos Conjuntos Habitacionais** **Análise De Métodos De Avaliação De Sustentabilidade Do Ambiente Construído : O Caso Dos Conjuntos**. 2008. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2008.

AZARIJAFARI, Hessam *et al.* Towards comparable environmental product declarations of construction materials: Insights from a probabilistic comparative LCA approach. **Building and Environment**, [S. l.], v. 190, n. August 2020, p. 107542, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107542>

AZEVEDO, Leticia Dalpaz de; GERALDI, Matheus Soares; GHISI, Enedir. Avaliação do Ciclo de Vida de diferentes envoltórias para habitações de interesse social em Florianópolis. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 123–141, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400463>

BARBALHO, Enéas de Andrade; SILVA, Eugênia Fonseca da; RÊGO, João Henrique da Silva. Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S. l.], v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0906>

BARBOZA, Douglas Vieira *et al.* Aplicação da Economia Circular na Construção Civil. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. e9871102, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i7.1102>

BARCELOS, Silvia Mara Bortoloto Damasceno *et al.* Circularity of Brazilian silk: Promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 296, n. April, p. 113373, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113373>

BATTAGIN, A. F. Características das escórias e pozolanas adicionadas aos cimentos Portland brasileiros. **Publicações ABCP**, [S. l.], 1987.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Instituto ed. [S. l.]: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2011. v. Capítulo 6p. 1–48. *E-book*.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda *et al.* **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia SIDAC**. 1º Edição. São Paulo - SP: [s. n.], 2022 a.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda *et al.* Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: uma ferramenta para incorporar indicadores ambientais na construção civil brasileira. **XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, [S. l.], v. 19, n. Canela. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2022 b.

BEN-ALON, Lola *et al.* Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material. **Building and Environment**, [S. l.], v. 160, n. May, p. 106150, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.028>

BEN. **Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Ministério ed. Rio de Janeiro : EPE, 2020.: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2020. *E-book*.

BIANCARDO, Salvatore Antonio *et al.* Modeling Roman Pavements Using Heritage-BIM: A Case Study in Pompeii. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 34–46, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.482>

BISSOLI-DALVI, Márcia *et al.* Sistematização de indicadores de sustentabilidade como ferramenta auxiliar ao projetista na seleção dos materiais de construção. **Arquitetura Revista**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 99–111, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4013/arq.2013.92.03>

BISSOLI-DALVI, Márcia *et al.* The sustainability of the materials under the approach of ISMAS. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 106, p. 357–363, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.030>

BISSOLI-DALVI, Márcia *et al.* Avaliação da Sustentabilidade da Madeira por Meio da Ferramenta ISMAS. **Floresta e Ambiente**, [S. l.], v. 24, n. 0, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/2179-8087.077214>

BRAVO, Miguel *et al.* Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 77, p. 357–369, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>

BRE - DIGEST 433. **Recycled aggregates**. London: BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 1998.

BRE GROUP. **PCR for Construction Products EPD (to EN 15804:2012)**. Walford - Inglaterra: [s. n.], 2012.

BREEAM. **BREEAM UK New Construction**. Reino Unido: [s. n.], 2018.

BS 8500-2. **Concrete: complementary British Standard to BS EN 206-1: specification for constituent materials and concrete**. London: BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2006.

BUENO, Cristiane *et al.* Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 112, p. 2208–2220, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.006>

CALDAS, Lucas; CARVALHO, Michele; TOLEDO FILHO, Romildo. Inserção da ACV no processo de projeto de edificações: avaliação de alternativas e ferramentas computacionais para a prática de mercado. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, [S. l.], n. 28, p. 0–1, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n28.2020.09>

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de fachadas para habitações sociais. **Sustentabilidade em Debate**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 238–256, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v7n2.2016.15913>

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasilia: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 71–85, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000300163>

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* ARGAMASSAS DE TERRA VERSUS CONVENCIONAIS: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL CONSIDERANDO O CICLO DE VIDA. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 115–128, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.115-128>

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* Avaliação do potencial de mitigação das mudanças climáticas com o uso de colmos de bambu na construção civil brasileira. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, [S. l.], v. 4, p. e45188, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.18225/lalca.v4i0.5188>

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 268, p. 121146, 2021 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121146>

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO₂-sink in bio concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 166, n. December 2020, p. 105346, 2021 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>

CALDAS, Lucas Rosse; CARVALHO, Michele Tereza Marques. Avaliação do desempenho de vedações verticais utilizando o Processo de Análise Hierárquica na tomada de decisão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 109–121, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8651552>

CALDAS, Lucas Rosse; CARVALHO, Michele Tereza Marques; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 343–362, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300433>

CALDAS, Lucas Rosse; LIRA, Júlia Santiago de Matos Monteiro; SPOSTO, Rosa Maria. Avaliação do ciclo de vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 138–

167, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18225/lalca.v1i1.3823>

CALDAS, Lucas Rosse; SPOSTO, Rosa Maria. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 91–108, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>

CALIXTO, António Miguel Saial. **Métodos de Avaliação da Sustentabilidade na Construção - Análise comparative e aplicação a caso de estudo**. 2016. - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, [s. l.], 2016.

CAMPOS, Felipe Henrique Azevedo. **Análise Do Ciclo De Vida Na Construção Civil : Um Estudo Comparativo Entre Vedações Estruturais Um Estudo Comparativo Entre Vedações Estruturais Em Painéis Pré-Moldados E Alvenaria Em Blocos De Concreto**. 2012. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, [s. l.], 2012.

CAMPOS, Renan Serralvo *et al.* Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Revista Materia**, [S. l.], v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0300>

CANCIO DÍAZ, Yudiesky *et al.* Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. **Development Engineering**, [S. l.], v. 2, n. June, p. 82–91, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001>

CARVALHO, Michele Tereza Marques. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de interesse social com foco no projeto**. 2009. - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, [s. l.], 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ac/v12n1/v12n1a14.pdf>

CASCIONE, Valeria *et al.* Integration of life cycle assessments (LCA) in circular bio-based wall panel design. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 344, n. February, p. 130938, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130938>

CECI-RENAUD, N.; KHAMSING, W. T. Consumers faced with environmental labelling. **General Directorate for Sustainable Development - Department for the Economy, Evaluation and Integration of Sustainable Development**, [S. l.], 2012.

COLANGELO, Francesco *et al.* Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 25, n. 9, p. 1790–1804, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01798-6>

COLE, R. J.; ROUSSEAU, D.; THEAKER, I. .. **Building Environmental Performance Assessment Criteria: Version 1 - Office Buildings**. Vancouver: [s. n.], 1994. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Building-environmental-performance-assessment-BEPAC-Cole/90ce526553e0db582649a7515ef9f38c4963f0a5?sort=relevance&pdf=true>

COLE, Raymond J.; LARSSON, Nils. **Green Building Challenge 2002 - GBTool User Manual**. [S. l.: s. n.] Disponível em: http://iisbe.org/down/gbc2005/GBC2k2/GBC2k2_Manual.pdf

CONAMA. **CONAMA 307:2002 - Gestão de Resíduos Sólidos (Construção Civil)**. [S. l.: s. n.]

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro *et al.* Avaliação de processos de misturas de concretos com agregados graúdos reciclados. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 255–265, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000300174>

CORLAITE LANA, Thiago Augusto; PEREIRA, Andréa Franco. ACV SIMPLIFICADA E ANÁLISE DE EMISSÕES DE CO₂ EM SISTEMAS DE VEDAÇÃO ARQUITETÔNICA. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 145–162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n1.145-162>

COSENZA, José Paulo; ANDRADE, Eurídice Mamede de; ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes de. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. e16147, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16147>

CRUZ RIOS, Fernanda; GRAU, David; CHONG, Wai K. Reusing exterior wall framing systems: A cradle-to-cradle comparative life cycle assessment. **Waste Management**, [S. l.], v. 94, p. 120–135, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.040>

CRUZ, Victor Filipi; GÓES, Thiago Montenegro. Contribuição do BIM para o desenvolvimento da Economia Circular no ambiente construído. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, [S. l.], n. 30, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n30.2021.01>

CSIRO HB 15. **Guide to the use of recycled concrete and masonry materials**. Austrália, Sidney: COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION, 2002.

DALVI, Márcia Bissoli. **ISMAS: a sustentabilidade como premissa para a seleção de materiais**. 2014. - Universidad del Bío-Bío, [s. l.], 2014. Disponível em: http://www.inovarse.org/sites/default/files/T11_0350_2173_7.pdf

DASCALAKI, Elena G. *et al.* Analysis of the embodied energy of construction materials in the life cycle assessment of Hellenic residential buildings. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 232, p. 110651, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110651>

DBGHK. **Works Bureau Technical Circular No. 12/2002: specifications facilitating the use of recycled aggregates**. Chinam Hong Kong: DEVELOPMENT BUREAU OF THE GOVERNMENT OF THE HONG KONG. WBTC – Wor, 2002.

DE ARAUJO, Thais Cristina Bastos; DOURADO, Harerton. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PAVERS INTERTRAVADO PRODUZIDOS COM REJEITOS GERADOS NOS DESDOBRAMENTOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 245–261, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v15i2.60435>

DECRETO Nº 38.047. **Regulamenta o art. 20, da Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009, no que se refere às normas viárias e aos conceitos e parâmetros para o dimensionamento de sistema viário urbano do Distrito Federal**. Brasília - DF: Camara Legislativa do Distrito Federal, 2017.

DGNB. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB. **German Sustainable Building Council**, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.dgnb.de/en/index.php>

DHANDAPANI, Yuvaraj *et al.* Mechanical properties and durability performance of

concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 107, n. July 2017, p. 136–151, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>

DI MARIA, Andrea *et al.* Environmental assessment of CO₂ mineralisation for sustainable construction materials. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [S. l.], v. 93, n. May 2019, p. 102882, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102882>

DIMOUDI, A.; TOMPA, C. Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 53, n. 1–2, p. 86–95, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.008>

DIN 4226-100 E. **Aggregates for concrete and mortar: part 100: recycled aggregates**. Berlin, Heidelberg: [s. n.], 2002.

DOS SANTOS, Rosana Campos *et al.* Indicadores Sustentáveis para Edificações em Prol da Consolidação do Conceito de Cidades Resilientes / Sustainable Indicators for Buildings for the Consolidation of the Concept of Resilient Cities. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 10, p. 98823–98840, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n10-280>

DOTTO, Bruna Righi; SILVA, André Souza. A representatividade da mobilidade urbana em certificações de sustentabilidade. **Cidades**, [S. l.], v. 2019, n. 38, p. 152–164, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15847/citiescommunitiesterritories.jun2019.038.art05>

DPTISA. **Standard specification for supply and delivery of pavement materials**. Australia, Adelaide: DEPARTMENT OF PLANNING, TRANSPORT AND INFRASTRUCTURE OF SOUTH AUSTRALIA, 2001.

DU, Hongjian; PANG, Sze Dai. High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 264, p. 120152, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120152>

DURÃO, Vera *et al.* Assessment and communication of the environmental performance of construction products in Europe: Comparison between PEF and EN 15804 compliant

EPD schemes. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 156, n. June 2019, p. 104703, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104703>

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à Economia Circular: o Racional de Negócio para Acelerar a Transição**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>

EN CEN. **Sustainability of Construction Works—Environmental Product Declarations—Core Rules for the Product Category of Construction Products EN CEN 15804: 2012+ A2: 2019**. Brussels, Belgium: [s. n.], 2019.

ENCICLO. **Entenda a importância da verificação em EPDs**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.enciclo.com.br/blog/entenda-a-importancia-da-verificacao-em-epds/>. Acesso em: 21 abr. 2021.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ (ESALQ). Uma árvore da Mata Atlântica chega a tirar 163 kg de CO₂ da atmosfera. **Celulose Online**, [S. l.], n. Meio Ambiente, p. 2013, 2013. Disponível em: <http://ciclovivo.com.br/noticia/cada-arvore-da-mata-atlantica-chega-a-retirar-163-kg-de-co2-da-atmosfera/>

FDT. **Standard specifications for construction of roads and bridges**. USA, Florida: FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2014.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 135–162, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000100008>

FERNANDES, Guilherme de Sousa. **Utilização de pavimento permeável de concreto com agregados de RCD na mitigação de alagamentos: estudo de caso do estacionamento do Instituto Central de Ciências da UnB**. 2020. - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, [s. l.], 2020.

FERREIRA, Enildo Tales. **Contribuição ao estudo do potencial de aproveitamento de agregados reciclados de RCC produzidos na Usiben - João Pessoa - em concreto estrutural aplicado em lajes pré-moldadas**. 2013. - Universidade Federal da Baía,

Salvador - BA, [s. l.], 2013.

FIGUEIREDO, CAMILLA FURTADO DE. **APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO CRITÉRIO DE SELEÇÃO PARA MATERIAIS UTILIZADOS EM CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS**. 2017. - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, [s. l.], 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/2105>

FISCHER, Anna Claudia. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO E DE EMISSÕES DE CO₂ DOS MATERIAIS DE MADEIRA APLICADOS NA PREFABRICAÇÃO DE VEDAÇÃO VERTICAL EM WOOD FRAME PARA O CONTEXTO BRASILEIRO**. 2020. - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2020.

FLIZIKOWSKI, Lis Camila. **Estimativa de emissões de dióxido de carbono na construção civil e neutralização com espécies florestais: um estudo de caso**. 2012. - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2012.

FOSSATI, Michele. **Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios**. 2012. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [s. l.], 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91376>

FREIRE, Diego. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO₂**. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/politica-de-republicacao-da-agencia-fapesp/30159/>. Acesso em: 14 mar. 2021.

FRÖHLICH, Jéssica. **Uso de resíduo cerâmico em cimentos ternários tipo LC³: estudo dos produtos da hidratação**. 2019. - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, [s. l.], 2019.

GALLO JUNIOR, Humberto *et al.* **COMPENSAÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ DURANTE A 14ª SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA NO VALE DO PARAÍBA-SP**. **BIOFIX Scientific Journal**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 311, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/biofix.v3i2.61890>

GEOFF, Hammond; CRAIG, Jones. Inventory of Carbon and Energy. **The University of Bath**, [S. l.], p. 1–64, 2008. Disponível em: www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/http://www.ecocem.ie/downloads/Inventory_of_Carbon_and_E

nergy.pdf

GOMES, M.; DE BRITO, J.; BRAVO, M. Mechanical Performance of Structural Concrete with the Incorporation of Coarse Recycled Concrete and Ceramic Aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 26, n. 10, p. 04014076, 2013. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000973](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000973)

GOMES, Nivaldo Simões; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy Fassi. Rotulagem Ambiental De Produtos: Uma Análise De 14 Programas Do Mercado Brasileiro, Sob O Olhar Do Consumidor. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 614, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e12018614-642>

GOMES, P. C. C. *et al.* Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. **Waste Management**, [S. l.], v. 45, p. 171–179, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.008>

GOMES, Vanessa. Indicadores de sustentabilidade de edifícios: estado da arte e desafios para desenvolvimento no Brasil. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 47–66, 2008.

GONZÁLEZ MAHECHA, Rosa Esperanza *et al.* Constructive systems for social housing deployment in developing countries: A case study using dynamic life cycle carbon assessment and cost analysis in Brazil. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 227, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110395>

GONZÁLEZ, María Jesús; GARCÍA NAVARRO, Justo. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. **Building and Environment**, [S. l.], v. 41, n. 7, p. 902–909, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>

HEMDADES, Manuela Imamura. **Benefícios das árvores e seu valor**. [s. l.], 2009.

HERNANDEZ, Jose Fernando Martirena; SCRIVENER, Karen. **Development and Introduction of a Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement in Cuba**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. (RILEM Bookseries).v. 10E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3>

HOE, Verônica Moreira Horner; PIRES, Armando Caldeira. A construção do Sistema Brasileiro de Declaração Ambiental de Produto. **Sustentabilidade em Debate**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 44–59, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v8n2.2017.23738>

HOPE, Tim. Getting started guide for beta participants. *In: U.S. Green Building Council*. [S. l.: s. n.]. p. 274. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-5652-0_4

HOSSAIN, Md Uzzal *et al.* Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 109, p. 67–77, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>

HUIJBREGTS, MAJ *et al.* ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. **National Institute for Public Health and the Environment**, [S. l.], p. 194, 2016. Disponível em: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>

HUIJBREGTS, Mark A. J. *et al.* ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 138–147, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

IBEC. CASBEE for new construction. **Institute for Building Environment and Energy Conservation, Japan Sustainable Building Consortium (JSBC)**, [S. l.], v. 1, p. 1–231, 2014.

IBEC. **Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC)**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>. Acesso em: 28 mar. 2022.

IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2015. v. *5E-book*.

IISBE, International Initiative for Sustainable Built Environment. **SBTool 2012-20**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.iisbe.org/node/140>. Acesso em: 23 mar. 2022.

IMBABI, Mohammed S.; CARRIGAN, Collette; MCKENNA, Sean. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 194–216, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>

Impactos Ambientais da Construção Civi. . [s. l.], 2019. Disponível em: <https://sustentarqui.com.br/impactos-ambientais-da-construcao-civil/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

IPCC. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE mudanças climáticas. *In*: 2019, **Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)**. [S. l.: s. n.] p. 28. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>

JAPPUR, Rafael Feyh; FRANCISCON, Mariana. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA UMA ORGANIZAÇÃO DO SEGMENTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 97–102, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2018.v4.n3.95-100>

JIS A 50 21. **Recycled aggregate for concrete-Class H**. Japão, Tokyo: JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD, 2005.

JOSEPH, Shiju; JOSEPH, Aneeta Mary; BISHNOI, Shashank. Economic Implications of Limestone Clinker Calcined Clay Cement (LC3) in India. *In*: SCRIVENER, Karen; FAVIER, Aurélie (org.). **RILEM BOOKSERIES**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. p. 501–507. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_62

LACERDA, Jeanicolau Simone de. **Afinal, quanto carbono uma árvore sequestra**. [s. l.], 2009.

LARSSON, Nils. Part A, User Guide to the SBTool 2012 assessment framework. **International Initiative for Sustainable Built Environment iiSBE**, [S. l.], p. 42, 2012 a.

LARSSON, Nils. Part B, User Guide to the SBTool 2012 assessment framework. **International Initiative for Sustainable Built Environment iiSBE**, [S. l.], p. 20, 2012

b.

LAURI, Linkosalmi *et al.* Environmental product declaration of timber products: The impact of allocation method to the impact categories. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 256, p. 120386, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120386>

LEAL, Cleber Eduardo Fernandes. **PEÇAS PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO: ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA NA INCORPORAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO**. 2018. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, [s. l.], 2018.

LEÃO, NATÁLIA MUNARO DE. **INFLUÊNCIAS GRECO-ROMANAS NA HISPÂNIA : Influências greco-romanas na Hispânia**. 2015. - Universidade Católica do Rio Grande do Sul., [s. l.], 2015.

LEI Nº 4.059. **Dispõe sobre a pavimentação ecológica nos condomínios no âmbito do Distrito Federal e dá outras providências**. Brasília - DF: Camara Legislativa do Distrito Federal, 2007.

LI, Yan; GU, Yanfang; LIU, Chunlu. Prioritising performance indicators for sustainable construction and development of university campuses using an integrated assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 202, p. 959–968, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.217>

LIMA, E. M.; FERNANDES, R. T. V.; DANTAS, S. L. QUANTIFICAÇÃO DE CO₂ EMITIDO DECORRENTE DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, [S. l.], p. 5, 2018. Disponível em: http://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddmencduru.pdf

LIN, Run-Sheng *et al.* Experimental studies on hydration–strength–durability of limestone-cement-calcined Hwangtoh clay ternary composite. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 269, p. 121290, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121290>

LINS, DIANA NASCIMENTO. **Análise da Resistência à Compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho**. 2017. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31381>

LPP/UFES. **Ferramenta ASUS Referencial Teórico**. Vitória-ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2015. *E-book*.

LUCAS, Vanessa Silvério. **CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – SISTEMA DE AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO**. 2011. - Universidade Nova de Lisboa, [s. l.], 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/5613>

MACAULAY, David. **Construção de uma cidade romana**. Martins Fo ed. São Paulo - SP: [s. n.], 1989. *E-book*.

MACÍAS, M.; GARCÍA NAVARRO, J. Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. **Informes de la Construcción**, [S. l.], v. 62, n. 517, p. 87–100, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/ic.08.056>

MACIEL, Marco Aurélio Diniz. **Levantamento de Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Obra da Indústria da Construção Civil em Maringá/PR**. 2016. - Universitário de Maringá - PR, [s. l.], 2016.

MALACARNE, Camila Salvi. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC³ - cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário - a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul**. 2019. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2019.

MARIN, Eriberto Francisco Bevilaqua; MASCARENHAS, Giovanni Martins de Araújo. Direito ao meio ambiente e mudanças climáticas: o constitucionalismo brasileiro e o acordo de Paris. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 254, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.27113>

MDT. **Standard specifications for construction**. USA, Michigan: MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012.

MEDEIROS, Larissa Mendes; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 365–

385, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200259>

MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.153213>

MF EHE-08. **instrucción de hormigón estructura**. Madrid, Spain: MINISTERIO DE FOMENTO, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS 2013, Ano-Base 2012; Relatório Final**. [S. l.]: Publicado no D.O.U., 2014. *E-book*.

MORAES, Antonio Carlos Flores de. **MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES**. 2013. - FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://doaj.org/article/caec98e788be4d529edac5746e73c871>

MOREIRA, Christian; REGO, João Henrique Silva. Efeito do teor de gipsita na resistência à compressão do cimento LC3. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S. l.], v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0900>

MOREL, J. .. *et al.* Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. **Building and Environment**, [S. l.], v. 36, n. 10, p. 1119–1126, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8)

MUZENDA, Tafadzwa Ronald *et al.* The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 107, n. January, p. 103516, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103516>

NAGATAKI, S. *et al.* Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 34, n. 6, p. 965–971, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.008>

NBN B 15-001. **BELGIUM STANDARD: concrete - Specification, performance, production and conformity**. Brussels: [s. n.], 2006.

NBR ABNT 15115. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos.** Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2004.

NUNES LAERA, Luiza Helena; SIMÕES PENELLO MEIRELLES, Margareth; FONSECATANIZAKI, Kenny. Controle de emissões de CO₂ na construção civil: uma análise da eficiência dos instrumentos legais disponíveis no município do Rio de Janeiro. **Revista Internacional Interdisciplinar INTERthesis**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 223–242, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/1807-1384.2012v9n1p223>

OCHARÁN, J. S.; LIMA, F. M. S.; LOVÓN, G. C. Avaliação comparativa ambiental da produção de agregados naturais e reciclados para a construção civil. In: 2019, **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minerios e Metalurgia Extrativa**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <http://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/031.pdf>

OICPPC. **Prescriptions Techniques PTV 406 : granulats de debris de demolition et de construction recycle.** Belgica, Bruxelas: ORGANISME IMPARTIAL DE CONTRÔLE DE PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION, 2016.

OLIVEIRA, Cinara Souza de. **Análise comparativa técnico-econômica entre os pavimentos de concreto asfáltico e blocos intertravados de concreto.** 2018. - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, [s. l.], 2018.

OLIVEIRA, Emmanuela Lopes de; SALLES, Mara Telles. Relations Between Urban Subsoil and Climate Change in Different Neighborhoods of Rio de Janeiro. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 23, p. 1–23, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20190178r2vu202016td>

OLIVEIRA, JORGE ANTONIO DA CUNHA. **PROPOSTA DE AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DE CANTEIROS DE OBRAS. METODOLOGIA ECO OBRA APLICADA NO DISTRITO FEDERAL – DF.** 2011. - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, [s. l.], 2011.

OLIVEIRA, Maria Fernanda *et al.* Sustentabilidade, Certificação Leed E Usuário: Estudo Em Retrofit De Edifício Corporativo. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 91–106, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2020.v6.n3.91-106>

OLIVEIRA, V. C. H. C. **Estratégias para a minimização da emissão de CO2 de concretos estruturais**. 2015. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-25072016-144256/publico/VanessaCarinaHeinrichsChiricoOliveira2015.pdf>

ONU. **Guia sobre Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque (EUA): [s. n.], 2016. *E-book*. Disponível em: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 24, n. 5, p. 832–838, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>

PAPADOPOULOU, Panagiota *et al.* Development of a pre-verified epd tool with process simulation capabilities for the aggregates industry. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13179492>

PASCHOALIN FILHO, João Alexandre; FRASSON, Sueli Aparecida; CONTI, Diego De Melo. Economia Circular: estudo de casos múltiplos em usinas de reciclagem no manejo de resíduos da construção civil. **Desenvolvimento em Questão**, [S. l.], v. 17, n. 49, p. 136–157, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2019.49.136-157>

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti *et al.* Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 7–20, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400002>

PAULA, Raphael Rodrigues de. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE ARGAMASSAS E CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)**. 2016. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PEDROSO, GILSON MARAFIGA. **AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE) DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO DE HABITAÇÕES**. 2016. - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB, [s. l.], 2016. Disponível em: http://www.pgea.unb.br/~lasp/research/DEFESA_VALERIO_AYMORE_MARTINS_

DM-500_2012.pdf

PESSOA, Rodrigo G. A. Q. *et al.* Comparative study of CO₂ emissions from ceramic brick and plaster block vertical seals. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 32–41, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4090/juee.2020.v14n1.032041>

PEŠTA, Jan *et al.* Sustainable masonry made from recycled aggregates: LCA case study. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 12, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12041581>

PILLAI, Radhakrishna G. *et al.* Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 118, n. March 2018, p. 111–119, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019>

PILZ, Thaisa Lana; MACENO, Marcell Mariano Corrêa. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO DA LITERATURA ACERCA DA AVALIAÇÃO DE RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 0049–0055, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecv16iss1pp0049-0055>

QUINA, Margarida J. *et al.* Life cycle assessment of lightweight aggregates produced with ashes from municipal solid waste incineration. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 1922–1931, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01079-2>

QUINTA E COSTA, Margarida; MONTEIRO, Isilda; RODRIGUES RIBEIRO, Vítor. Educar para a Economia Circular – uma experiência inovadora na formação de professores
Educating for the Circular Economy. **Saber & Educar**, [S. l.], n. 27, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17346/se.vol0.370>

RAMÍREZ-VILLEGAS, Ricardo; ERIKSSON, Ola; OLOFSSON, Thomas. Life cycle assessment of building renovation measures—trade-off between building materials and energy. **Energies**, [S. l.], v. 12, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12030344>

RESCH, Eirik *et al.* Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings—Timing, uncertainty, and emission sources. **Building and Environment**, [S. l.], v. 187, n. October 2020, p. 107399, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107399>

RNSI N - 590. **Dutch supplement to NEN-EN 12620 Aggregates for concrete**. Delf: ROYAL NETHERLANDS STANDARDIZATION INSTITUTE. NEN 5905, 2005.

RODACOSKI, Jaime Lima; ANDRADE, Carlos Fernando S. de. Calculation and analysis for the planting of trees in the compensation of the emission of greenhouse gases emitted by cattle. **Ambiência**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 633–645, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2014.02.15rc>

RODRÍGUEZ, Rafael; PÉREZ, Fernando. Carbon foot print evaluation in tunneling construction using conventional methods. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S. l.], v. 108, n. December 2020, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103704>

ROH, Seungjun *et al.* Environmental evaluation of concrete containing recycled and by-product aggregates based on life cycle assessment. **Applied Sciences (Switzerland)**, [S. l.], v. 10, n. 21, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10217503>

ROSADO, Laís Peixoto; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Avaliação do ciclo de vida do Sistema Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil da Região Metropolitana de Campinas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 71–82, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019179604>

ROSSI, Efigênia. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso**. 2013. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2013.

SAADE, Marcela Ruschi Mendes *et al.* Aplicação da Análise do Ciclo de Vida na construção civil: discussão sobre alocação de impactos entre o aço e suas escórias. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S. l.], v. 1, n. 6, p. 97, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v1i6.8634489>

SAADE, Marcella Ruschi Mendes. **Modelagem de multifuncionalidade aplicada a ACV de cimentos e concretos**. 2017. - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE

CAMPINAS, [s. l.], 2017.

SACHO, Sara Duarte *et al.* Avaliação Econômica E De Emissões De Co2 Da Reciclagem De Resíduos De Construção E Demolição Classe a: Estudo De Caso Para Goiânia - Go. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2016.v2.n2.20-28>

SÁNCHEZ BERRIEL, S. *et al.* Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 124, p. 361–369, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>

SANTANA, Mateus; TOSHIE OIKO, Olivia. Carbon Footprint: In search of a definition and method for Green Logistics. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 197–214, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v14i4.2334>

SANTOS, Alex Gabriel Marques dos; MACHADO, Taysa Tamara Viana. COMPORTAMENTO SOCIOAMBIENTAL DO CONSUMIDOR: UM ESTUDO EM ALAGOA GRANDE – PB. **Revista Gestão e Organizações**, [S. l.], v. 01, n. 01, 2016.

SARTE SN 670 062. **Recyclage: généralités**. SWISS, Zurich: SWISS ASSOCIATION OF ROAD AND TRANSPORTATION EXPERTS, 1998.

SATOLA, Daniel *et al.* Life Cycle GHG Emissions of Residential Buildings in Humid Subtropical and Tropical Climates: Systematic Review and Analysis. **Buildings**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings11010006>

SCANDELARI, Vanessa do Rocio Nahhas *et al.* A importância dos indicadores de sustentabilidade na gestão da qualidade de empresas de construção civil. *In*: 2016, **INOVARSE**. [S. l.: s. n.]

SCRIVENER, Karen *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 114, n. March 2017, p. 49–56, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>

SCRIVENER, Karen; FAVIER, Aurélie. **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. (RILEM Bookseries).v. 10E-book. Disponível

em: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3>

SCRIVENER, Karen L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, [S. l.], v. 7, n. July, p. 11–21, 2014.

SEHNEM, Simone *et al.* Improving sustainable supply chains performance through operational excellence: circular economy approach. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 149, n. January, p. 236–248, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.021>

SILVA, Bruna Vicente da. **CONSTRUÇÃO DE FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES**. 2013. - Universidade de São Paulo (Escola Politécnica), [s. l.], 2013.

SILVA, GIVALDO BARBOSA DA. **AS CERTIFICAÇÕES COMO INSTRUMENTO ÉTICO DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL EM EDIFICAÇÕES DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2014. - Universidade Federal de Sergipe, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2013.06.007>

SILVA, Vanessa Gomes da. Metodologias de avaliação de desempenho ambiental de edifícios: estado atual e discussão metodológica. **Habitacção mais Sustentável**, [S. l.], p. 60, 2007.

SILVA, Danillo de Almeida e. **Estudo da influência do índice de forma do graúdo nas propriedades mecânicas do concreto**. 2012. - Dissertação de (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34443.13608>

SILVA, Danillo de Almeida e; MELO, Carlos Eduardo Luna de. Desafios para o concreto sustentável. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 7, n. 17, p. 1543–1562, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071732](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071732)

SOARES, Carlos Pedro Boechat; OLIVEIRA, Marcio Leles Romarco de. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 26, n. 5, p. 533–539, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000500002>

SOARES, JOÃO VICTOR ALMEIDA *et al.* O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA PRODUÇÃO DE PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA, UMA REVISÃO. / THE USE OF CIVIL CONSTRUCTION WASTE IN THE PRODUCTION OF INTERLOCK FLOORING, A REVIEW. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 11, p. 89914–89934, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-421>

SOUSA, RODRIGO NUNES DE; OSTERNO, FRANCISCO YURI RIOS; ALBUQUERQUE, GERSON LUIZ A. POLIANO. Influência da pavimentação das ruas na temperatura da cidade de sobral. *In*: 2017, Belém - PA. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017 8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil**. Belém - PA: [s. n.], 2017. p. 5.

SPOSTO, Rosa Maria; CALDAS, Lucas Rosse; NABUT NETO, Abdala Carim. Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas de light steel framing no Brasil. **Oculum Ensaios**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 163, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.24220/2318-0919v13n1a2773>

STANITSAS, Marios; KIRYTOPOULOS, Konstantinos; LEOPOULOS, Vrassidas. Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 279, p. 123774, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123774>

TAVARES, Aline; BORSCHIVER, Suzana; FERREIRA, Tatiana. A RELAÇÃO ENTRE A INDÚSTRIA QUÍMICA E O SETOR DE BENS DE CONSUMO NÃO DURÁVEIS NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR. **Cadernos de Prospecção**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 1030, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.9771/cp.v11i4.27198>

TAVARES, Aline Souza; BORSCHIVER, Suzana. Elaboração de Roadmap Tecnológico e de Modelo de Negócios de Economia Circular. **Cadernos de Prospecção**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 810, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.9771/cp.v14i3.39052>

TDTS - 421. **concret with hydraulic ciment**. USA, Texas: TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Specification 421, 2014.

TEODORO, Maria Inês. **Energia embutida na construção de edificações no Brasil:**

Contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul. 2017. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2017.

Disponível em:
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-01022018-151533/publico/Tese_Versao_Corrigida_Maria_Ines_Teodoro.pdf&ved=2ahUKEwjtmM0_DqAhWjA9QKHdX7BcAQFjABegQIBRAI&usg=AOvVaw0pCNeyqNU94kVDpREmc

THIEL, Cassandra L. *et al.* A materials life cycle assessment of a net-zero energy building. **Energies**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 1125–1141, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en6021125>

TORGAL, F.; JALALI, S. Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção. **CM Materials**, [S. l.], p. 2010, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/28852>

UGAYA, Cássia Maria Lie; NETO, José Adolfo de Almeida; FIGUEIREDO, Maria Cléa Brito de. **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro.** Instituto ed. Brasília, DF: Ibict, 2019., 2019. *E-book*. Disponível em: <http://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2019/07/Relatório-de-Recomendações-de-Modelos-de-Avaliação-de-Impacto-para-o-Contexto-Brasileiro.pdf>

ULSEN, C. *et al.* Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 40, p. 1168–1173, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.004>

VALE, R. VALE, B. FAY R. **National Australian Built Environment Rating System.** [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.nabers.gov.au/about/what-nabers>. Acesso em: 25 mar. 2022.

VANZOLINI; CERTIVÉA. HQE Edifícios residenciais em construção. **Processo AQUA**, [S. l.], p. 152, 2021. Disponível em: https://vanzolini.org.br/wp-content/uploads/2022/01/RT_AQUA-HQE-Edificios_ao-residenciais-2021.pdf

VANZOLINI. **AQUA-HQE.** [s. l.], 2022. Disponível em: <https://vanzolini.org.br/produto/aqua-hqe/#:~:text=AQUA-HQE™> é uma, Brasil

exclusivamente pela Fundação Vanzolini. Acesso em: 28 mar. 2022.

VIEIRA, J. P. B.; CORREIA, J. R.; DE BRITO, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 41, n. 5, p. 533–541, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.002>

VIZCAÍNO-ANDRÉS, L. M. *et al.* Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. **Materiales de Construcción**, [S. l.], v. 65, n. 317, p. e045, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2015.00614>

WANG, Lei *et al.* On the use of limestone calcined clay cement (LC3) in high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 144, n. July 2020, p. 106421, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106421>

WEN, Baohua *et al.* The role and contribution of green buildings on sustainable development goals. **Building and Environment**, [S. l.], v. 185, n. August, p. 107091, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107091>

XIA, Bing; DING, Tao; XIAO, Jianzhuang. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. **Waste Management**, [S. l.], v. 105, p. 268–278, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015>

YIGITCANLAR, Tan; KAMRUZZAMAN, Md. Does smart city policy lead to sustainability of cities? **Land Use Policy**, [S. l.], v. 73, n. January, p. 49–58, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.01.034>

YU, Chang Man. **Sequestro florestal de carbono no Brasil – Dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas**. 2004. - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2004.

YU, Jing; WU, Hao-Liang; LEUNG, Christopher K. Y. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength Engineered Cementitious Composites (ECC). **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 262, p. 121343, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121343>

ZABALZA BRIBIÁN, Ignacio; VALERO CAPILLA, Antonio; ARANDA USÓN, Alfonso. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, [S. l.], v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>

ZHANG, Duo *et al.* Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 114, n. August, p. 103766, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103766>

ANEXO A - FORMULÁRIO APLICADO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS PARA A PESQUISA

1) EXTRAÇÃO

Método de extração por _____. Utilizam explosivos?

() N () Se sim...Qual é o tipo?_____ E a marca?
_____ Qual é a quantidade utilizada?
_____(g/m³ de brita extraída) Há plano de fogo? S () N () Por quê?

No caso de outros métodos Extração por _____

Descrição _____

b) Custo.

Qual é o processo mais custoso? _____ E o menos custoso?_____

2) BENEFICIAMENTO

a) Qual é o fluxograma do processo de beneficiamento?

b) Qual é a classificação das britas produzidas?

Brita (no.) Faixa granulométrica (mm) Usos Densidade média (g/cm³)

c) Produção: qual é a quantidade de brita (para utilização em concretos) produzida por dia? _____(ton)

d) Equipamentos Nome do equipamento _____ Código
_____ Modelo _____ Fabricante
_____ Dimensões _____x_____ (m) Regime de
trabalho _____ (h) Capacidade
_____ (m³/h) Granulometria da alimentação
_____ (mm) Granulometria do produto

_____ (mm) Consumo de revestimento
_____ (g/m³) Tipo de revestimento
_____ Potência _____ (CV) ou
_____ (kW) Gasto energético _____ (L de diesel/h)
ou _____ (kWh) Qual é o tipo de diesel utilizado? () S1800 () S500 () S50 ()
outros () S10

Razão de redução _____ Custo aproximado do equipamento
_____ (mil reais) Manutenção do equipamento
_____ (mil reais) Depreciação _____
(ano) No caso de peneiras: Ângulo de inclinação _____ (o) No caso de
rebitadores: Carga circulante _____ (%) Há certificação ambiental? S()

N() Se sim.... Qual? _____ (repete-se esse item até a descrição total
dos equipamentos)

3) TRANSPORTE

a) Extração Há uso de escavadeiras ou retroescavadeiras? S() N() Em caso negativo:
Como é feito o transporte na extração?
_____ Em caso
afirmativo:

Tipo _____ (E - escavadeira ou R - retroescavadeira) Modelo
_____ Marca _____ Ano _____
Capacidade _____ (m³ de brita / h) Consumo de combustível
_____ (L de diesel / h) Qual é o tipo de diesel utilizado? () S1800 ()
S500 () S50 () S10

Há certificação ambiental? S()

Se sim....Qual? N()

Transporte até o beneficiamento.

Há uso de caminhões? S() N() Em caso negativo: Como é feito o transporte até o
beneficiamento?

Em caso afirmativo:

Tipo _____ (eixos/tração) Modelo _____ Potência _____ (CV) Marca _____ Ano _____
Capacidade _____ (m3 de brita) Qual é a quilometragem média da extração ao beneficiamento? _____ (km) Consumo de combustível _____ (L de diesel / km)

Qual é o tipo de diesel utilizado? () S1800 () S500 () S50 () S10

Há certificação ambiental? S()

Se sim....Qual? N() _____

Transporte do beneficiamento aos caminhões.

Há uso de escavadeiras ou retroescavadeiras? S() N() Em caso negativo: Como é feito o transporte _____ na extração? _____ Em caso afirmativo:

Tipo _____ (E - escavadeira ou R - restroescavadeira) Modelo _____ Marca _____ Ano _____
Capacidade _____ (m3 de brita / h) Consumo de combustível _____ (L de diesel / h) Qual é o tipo de diesel utilizado? () S1800 () S500 () S50 () S10

Há certificação ambiental? S() Se sim....Qual? N()

Transporte aos centros consumidores

Há uso de caminhões? S() N() Em caso negativo: Como é feito o transporte até os centros consumidores? _____ Em caso afirmativo:

Tipo _____ (eixos/tração) Modelo _____ Potência _____
_____ (CV) Marca _____ Ano _____

Capacidade _____ (m3 de brita) Qual é a quilometragem média da
mineração aos centros consumidores? _____ (km)

Consumo de combustível _____ (L de diesel / km) Qual é o tipo de
diesel utilizado? () S1800 () S500 () S50 () S10

Há certificação ambiental? S()

Se sim....Qual? N() _____. Qual é a distância mínima até os centros
consumidores? _____ (km) Qual é a distância máxima até os centros
consumidores (consumidor mais distante)? _____ (km)

4) JAZIDA E ENTORNO

a) Qual era o antigo uso da área? _____ b) Quais foram as
atividades para início da mineração? () decapeamento () desmatamento () retirada de
fauna () outros, especificar: _____

c) Se houve decapeamento, qual foi a quantidade de material retirado? _____
(m3) ou _____(ton) Qual foi a destinação desse material? () aterros ()
armazenamento para recuperação da cava () outros, especificar:

d) Em qual bacia hidrográfica está inserida? _____ e) Qual
é a distância até o curso d'água mais próximo? _____ f) Qual é o
nível do lençol freático (n.a.) ? _____ g) Qual é a vida útil da
área? _____ (anos) h) Qual é a quantidade estimada de brita
na jazida? _____ i) Qual é o tamanho da área titulada?
_____ (m2) j) Qual é o tamanho da área lavrada?
_____ (m2) k) Qual é a relação estéril/minério?
_____ l) O que é feito com os resíduos
(estéril)? _____

Outras observações:

ANEXO B - LEVANTAMENTO DO INVENTÁRIO

A coleta de dados para o levantamento do inventário foi realizada por meio de visitas técnicas junto à fábrica de pré-moldados no Guará - DF, na qual foram aplicadas entrevistas com funcionários e questionário elaborado com intuito de coletar informações sobre a produção do bloco de pavimento intertravado de concreto, considerando todas as entradas e saídas de materiais.

Tabela B.1 – Transporte agregado britado

Transporte	Material	KM	Máquinas Pesados (km/l)	Energia (MJ/l)	Fator de Emissão (Kg CO ₂ /l)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Transporte T1	Pedrisco	5	6,8	37,3	2,603	2,29	0,16
	Pó de pedra	5	6,8	37,3	2,603	2,29	0,16
	Areia fina	0,5	1,18	37,3	2,603	1,32	0,09
Transporte T2	Pedrisco	0,5	1,18	37,3	2,603	2,63	0,18
	Pó de pedra	0,5	1,18	37,3	2,603	2,63	0,18
	Areia fina	0,5	1,18	37,3	2,603	2,63	0,18
Transporte T2.1	Pedrisco	76	3,4	37,3	2,603	39,49	2,76
	Pó de pedra	76	3,4	37,3	2,603	39,49	2,76
	Areia fina	34	3,4	37,3	2,603	39,49	2,76
Transporte T3	Piso intertravado	30	5,8	37,3	2,603	16,08	1,12
Transporte T4	Piso intertravado	30	5,8	37,3	2,603	12,86	0,90
Transporte T5	Entulho	1	1,18	37,3	2,603	2,63	0,18
Transporte T6	Entulho	51	6,8	37,3	2,603	23,31	1,63
Transporte T6.1	Entulho	1	1,18	37,3	2,603	1,05	0,07
Total de Energia (MJ) e Total de Emissões (kgCO₂)						187,16	13,06

Tabela B.2 – Extração agregado britado

Extração	UF	Perfuratriz (Ldiesel/h)	Energia (MJ/l)	Fator de Emissão (Kg CO ₂ /l)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Pedrisco	m ³	1,5	37,3	2,603	55,95	3,90
Pó de pedra	m ³	1,5	37,3	2,603	55,95	3,90

Tabela B.3 – Extração agregado miúdo

Extração	UF	Draga (Ldiesel/h)	Energia (MJ/l)	Fator de Emissão (Kg CO ₂ /l)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO ₂)
Areia	m ³	10,4	37,3	2,603	129,31	9,02

Tabela B.4 – Beneficiamento agregado britado

Beneficiamento da brita	Energia	UF
Energia elétrica (kWh)	10,8	m ³

Tabela B.5 – Beneficiamento agregado britado

Beneficiamento da brita	Unidade Funcional (UF)	Energia (MJ/UF)	Fator de Emissão (kgCO₂)
Eletricidade	kWh	6,00	0,06

Tabela B.6 – Produção agregado reciclado

Produção do Agregado reciclado	Emissão de CO₂ (kgCO₂/t)	Energia incorporada (MJ/t)
Agregado Reciclado ARC	1,9	19,9

Tabela B.7 – Beneficiamento agregado britado

Beneficiamento da brita	UF	kWh	Energia (MJ/kWh)	Fator de Emissão (Kg CO₂/kWh)	Total de Energia (MJ)	Total de Emissões (kgCO₂)
Pedrisco	m ³	10,8	6,00	0,06	64,80	0,648
Pó de pedra	m ³	10,8	6,00	0,06	64,80	0,648

Tabela B.8 – Produção bloco de pav. Intertravado de concreto por tonelada

Produção Intertravado	Piso	Energia incorporada (MJ/t)	Fator de Emissão de CO₂ (kgCO₂/t)
Cimento CPV		3366	799
Areia natural		155,76	10,89
Pedrisco		110,64	6,730
Pó de pedra		103,66	6,200
Agregado reciclado		19,9	1,9

Tabela B.9 – Produção bloco de pav. Intertravado de concreto (Kwh)

Produção Piso Intertravado	Kwh	Energia (MJ/UF)	Fator de Emissão (kgCO₂)
Máquina Pavimentos	180	1080	10,8
Transportadora de agregado	30	180	1,8
Misturador dos materiais	40	240	2,4
Total da produção / hora	250	1500	15

Tabela B.10 – Produção bloco de pav. Intertravado de concreto (UF)

Piso intertravado Master	Unidade Funcional (UF)	Und	Energia (MJ/UF)	Fator de Emissão (kgCO₂)
Produção Piso Intertravado	hora	3.450 pç/h	1500	15
	und	1 pç	0,4348	0,0043
	m ²	39,5 pç/m ²	17,17	0,17
	Pallete	360 pç/pal	156,52	1,57

Tabela B.11 – Transporte resíduos

Transporte / Distância	Caminhões Pesados (km/Ldiesel)	(UF)	Energia (MJ/UF)	Fator de Emissão (kgCO₂/UF)	Total de Energia (MJ/UF)	Total de Emissões (kgCO₂)
Transporte T4 (50 km)	5,8	litro	37,3	2,6	26,80	1,87
Disposição aterro (15 km)	1,18	litro	37,3	2,6	39,51	2,75
Disposição/Aterro: Total de Energia (MJ/L), Emissões (KgCO ₂ /L)					66,31	4,62

Tabela B.12 – Cenário A - berço ao portão

Cenário A - berço ao portão		Distância	UF	kg / m²	Energia (MJ/UF)	Emissão (kgCO₂/UF)
Matéria Prima	m ³					
Areia	m ³		1,46 t/m ³	34,87	3,72	0,26
Transportes (12 t)	5,8 km/l	34			0,64	0,04
Pó de Pedra	m ³		1,53 t/m ³	106,12	7,19	0,43
Transportes (12 t)	5,8 km/l	76			4,32	0,30
Pedrisco (Brita 0)	m ³		1,70 t/m ³	45,48	2,77	0,18
Transportes (12 t)	5,8 km/l	76			1,85	0,13
Cimento (CPV 50)	m ³		1,40 t/m ³	28,80	69,25	16,44
Transportes	5,8 km/l	54			0,83	0,06
Produção Piso Intertr.	m ²		1 m ²	39,5 Pç	17,69	0,21
Transportes (12 t)	5,8 km/l	30		215,3	3,46	0,43
Total de Emissões (kgCO ₂) e Energia (MJ) / m ²					111,74	18,48

Tabela B.13 – Cenário B - berço ao túmulo

Cenário B - berço ao túmulo		Distância	UF	kg / m²	Energia (MJ/UF)	Emissão (kgCO₂/UF)
Matéria Prima	m ³					
Areia	m ³		1,46 t/m ³	34,87	3,72	0,26
Transportes (12 t)	5,8 km/l	34			0,64	0,04
Pó de Pedra	m ³		1,53 t/m ³	106,12	7,19	0,43
Transportes (12 t)	5,8 km/l	76			4,32	0,30
Pedrisco (Brita 0)	m ³		1,54 t/m ³	45,48	2,77	0,18
Transportes (12 t)	5,8 km/l	76			1,85	0,13

Cimento (CPV 50) (12 t)	m ³		1,40 t/m ³	28,80	69,25	16,44
Transportes	5,8 km/l	54			0,83	0,06
Produção Piso Intert.	m ²		1 m ²	39,5 Pç	17,69	0,21
Transportes (12 t)	5,8 km/l	30		215,3	3,46	0,43
Aterro Disposição (15 km)	1,8 km/l	15	1 m ²	215,3	0,90	0,06
Transportes (12 t)	5,8 km/l	50	1 m ²	215,3	0,48	0,03
Total de Emissões (kgCO2) e Energia (MJ) / m ²					113,12	18,58

Tabela B.14 – Cenário C - berço ao berço

Cenário C - berço ao berço		Distância	UF	Kg / m ²	Energia (MJ/UF)	Fator de Emissão (KgCO ₂ /UF)
Matéria Prima	m ³					
Areia - Reciclada	m ³		1,45 t/m ³	34,87	0,48	0,05
Transportes	5,8 Km/l	30			1,13	0,04
Pó de Pedra - Reciclada	m ³		1,45 t/m ³	106,12	1,46	0,14
Transportes	5,8 Km/l	30			2,28	0,12
Pedrisco (Brita 0) - Reciclada	m ³		1,45 t/m ³	45,48	0,62	0,06
Transportes	5,8 Km/l	30			1,30	0,05
Cimento (CPV 50)	m ³		1,40 t/m ³	28,80	69,25	16,44
Transportes	5,8 Km/l	54			0,83	0,06
Produção Piso Intertravado	m ²		1 m ²	39,5 Pç	2,95	0,28
Transportes	5,8 Km/l	30		215,3	3,98	0,24
Reciclagem	m ³		1,45 t/m ³	215,3	2,95	0,28
Transportes	5,8 Km/l	30		215,3	4,03	0,24
Total de Emissões (KgCO ₂) e Energia (MJ) / m ²					91,27	18,00

Tabela B.15 – Traço do piso intertravado

Traço do piso intertravado						
Matéria Prima (Paver)	Kg		Und 5,45		m ² (39,5 pc)/Kg	Paleta (360 pc)/kg
	Kg	%	Kg			
Areia fina natural	230	16,20	0,88		34,87	317,79
Pó de pedra	700	49,30	2,69		106,12	967,18
Brita 0 (Pedrisco)	300	21,13	1,15		45,48	414,51
Cimento CP V (50 Mpa)	190	13,38	0,73		28,80	262,52
Massa total	1420	100,00	5,45		215,28	1962,00

Tabela B.16 – Matéria Prima bloco

Matéria Prima (Paver)	Matéria Prima (Paver) %

Areia fina natural	16,19%
Pó de pedra	49,29%
Brita 0 (Pedrisco)	21,12%
Cimento CP V (50 Mpa)	13,38%
Total	100

Tabela B.17 – Etapas do ciclo de vida do bloco

Etapas	(MJ/m²)	(kgCO₂/m²)
Areia fina natural	3,63%	1,59%
Pó de pedra	9,59%	3,83%
Pedrisco	3,85%	1,62%
Cimento CPV	58,35%	86,35%
Produção do bloco de pav.	17,61%	3,36%
Reciclagem	5,82%	2,74%
Aterro Disposição	1,15%	0,51%
Total	100,00%	100,00%

ANEXO C - LEVANTAMENTO PARA AÇÕES DE MELHORIAS AMBIENTAIS, SELEÇÃO DE MATERIAIS

Seleção materiais substituinte A, B, C, D, E, F, G, H, I.

Fornecedor 01 - Material A (Areia reciclada)

Distância: 44,8 Km (Coleta - Usina de reciclagem, entrega Fábrica de Blocos)

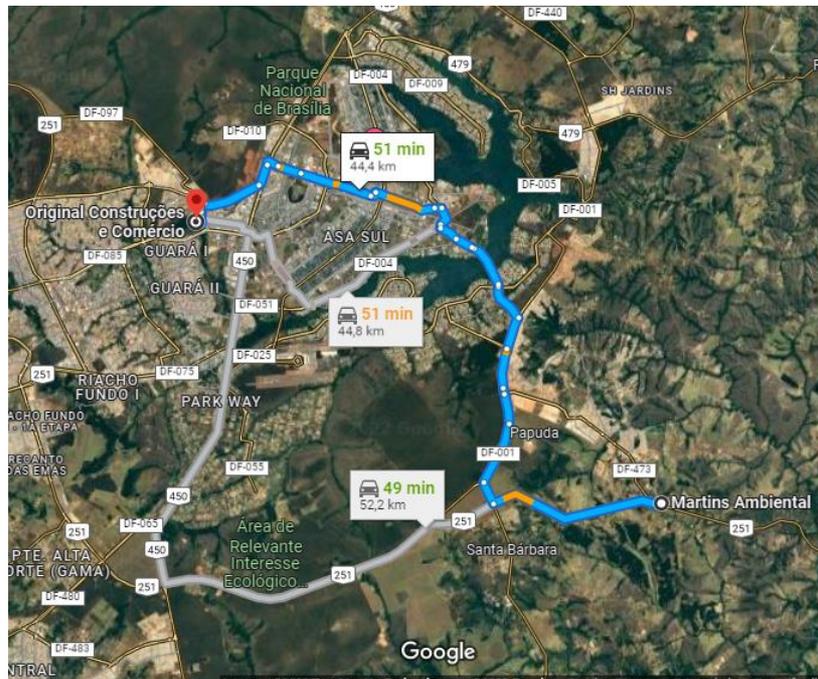


Imagem C.1 - Fornecedor 01 - Material A (Areia reciclada)

Fornecedor 02 - Material B (Areia artificial - britada)

Distância: 34 Km (Coleta - Usina de britagem, entrega Fábrica de Blocos)

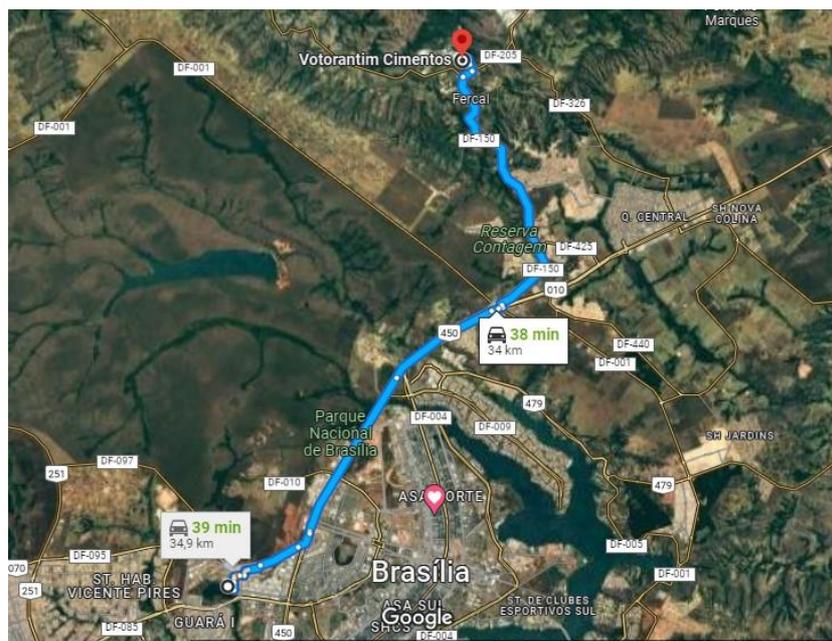


Imagem C.2 - Fornecedor 02 - Material B (Areia artificial - britada)

Fornecedor 03 - Material C (Seixo rolado)

Distância: 130 Km (Coleta – Rio corumbá, entrega Fábrica de Blocos)

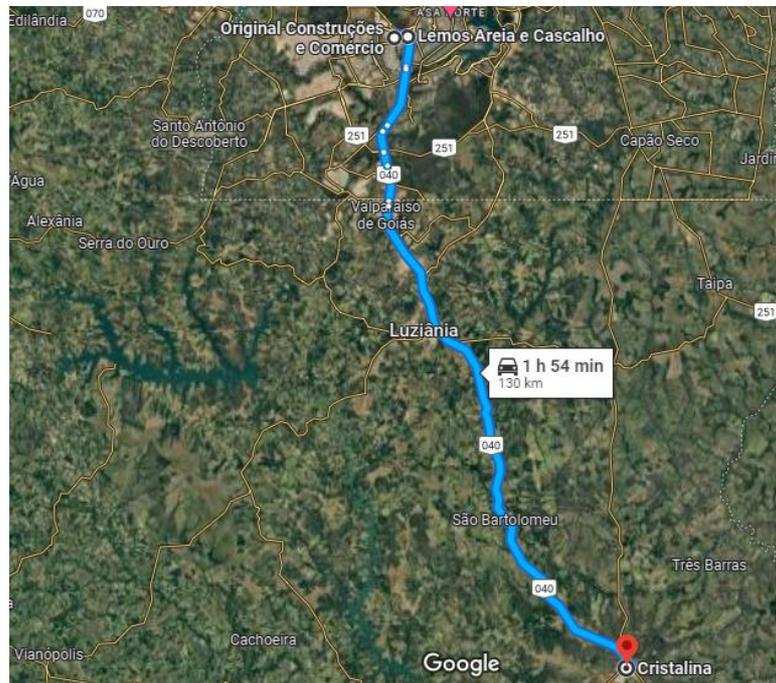


Imagem C.3 - Fornecedor 03 - Material C (Seixo rolado)

Fornecedor 01 - Material D (Pedrisco RCD)

Distância: 44,8 Km (Coleta - Usina de reciclagem, entrega Fábrica de Blocos)

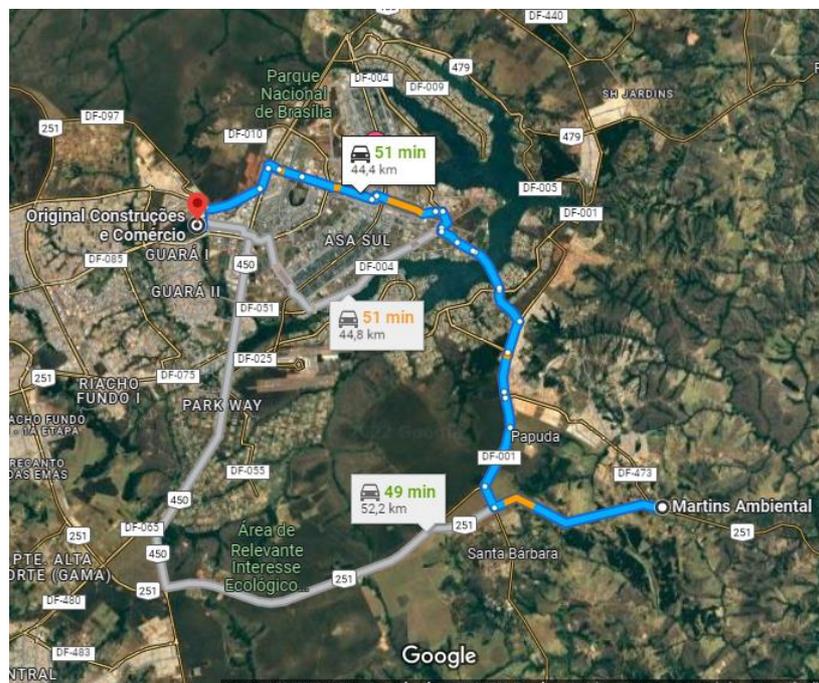


Imagem C.4 - Fornecedor 01 - Material D (Pedrisco RCD)

Fornecedor 04 - Material E (Pedrisco ARC)

Distância: 6 Km (O agregado reciclado de concreto ARC é produzido com os artefatos de concreto que por algum motivo não puderam ser comercializados, por algum defeito na fabricação, produzidos no próprio canteiro da fábrica dos blocos.

Fornecedor 05 - Material F, G, H, I (cimentos CP-IIIE, CP III, PC IV e LC³) – Fábrica Votorantim

Distância: 34 Km (Coleta - Usina de britagem, entrega Fábrica de Blocos)

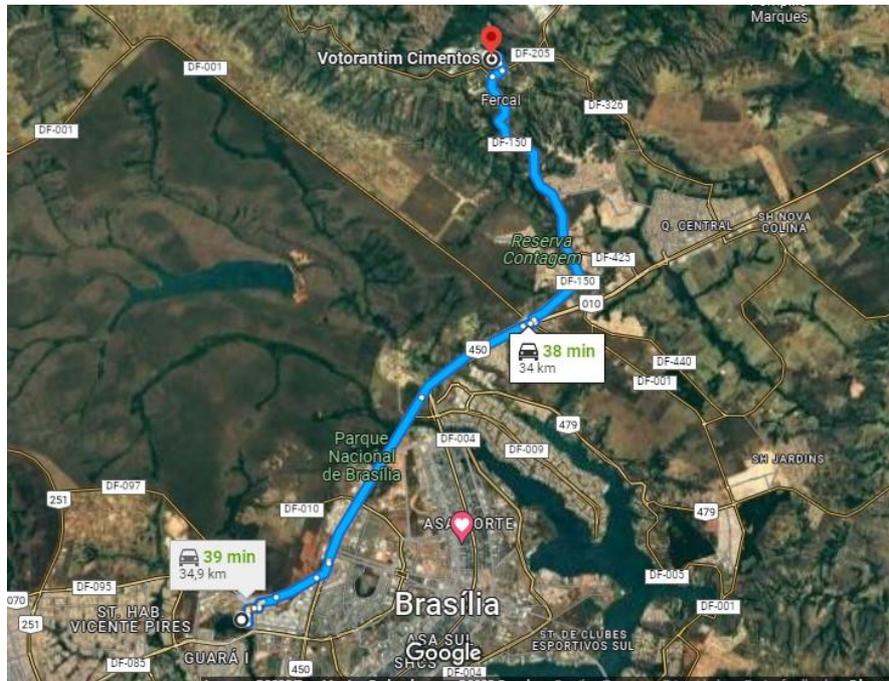


Imagem C.5 - Fornecedor 05

Material F, G, H, I (cimentos CP-IIIE, CP III, PC IV e LC³) – Fábrica Ciplan
Distância: 37,6 Km (Coleta - Usina de britagem, entrega Fábrica de Blocos)

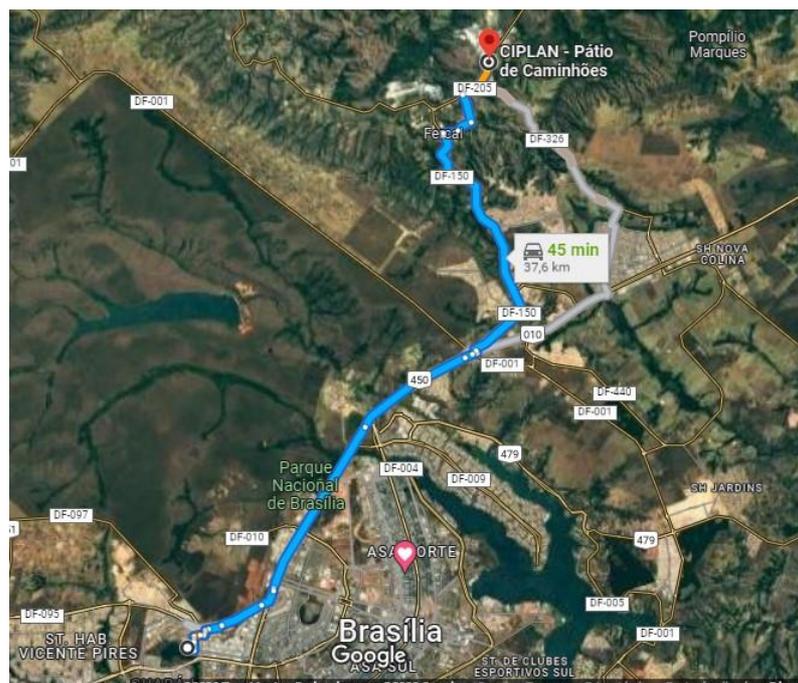


Tabela C.1 – Seleção da matéria prima para melhorias ambientais

Matéria prima	Emissão (MS) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MR) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MS)/Emissão (MR)	Energia (MS) (MJ/t)	Energia (MR) (MJ/t)	Energia (MS)/Energia (MR)
Material A (Areia reciclada)	12,07	10,89	1,11	61,77	155,76	0,40
Material B (Areia artificial)	9,22	10,89	0,85	56,83	155,76	0,36
Material C (Pedrisco de seixo)	43,81	6,73	6,51	100,71	110,64	0,91
Material D (Pedrisco RCD)	27,07	6,73	4,02	61,77	110,64	0,56
Material E (Pedrisco ARC)	6,52	6,73	0,97	44,03	110,64	0,40
Matéria prima	Emissão (MS) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MP) (kgCO ₂ /t)	Emissão (MS)/Emissão (MP)	Energia (MS) (MJ/t)	Energia (MP) (MJ/t)	Energia (MS)/Energia (MP)
Material F (CP II-E)	607	799	0,76	2256	3366	0,67
Material G (CP III)	351	799	0,44	2196	3366	0,65
Material H (CP IV)	522	799	0,65	2296	3366	0,68
Material I (LC ³)	468	799	0,59	2500	3366	0,74

Tabela C.2 – Seleção material substituinte para melhorias ambientais

Material substituinte		kgCO ₂ /t	Energia (MJ/t)
Areia reciclada (RCD)	Material A	12,07	61,77
Areia artificial (britada)	Material B	9,22	56,83
Pedrisco de seixo	Material C	43,81	100,71
Pedrisco reciclado RCD	Material D	27,07	61,77
Pedrisco reciclado ARC	Material E	6,52	44,03

Tabela C.3 – Seleção material substituinte aglomerante para melhorias ambientais

		kgCO ₂ /t	Energia (MJ/t)
Cimento CP II-E	Material F	607	2256
Cimento CP III	Material G	351	2196
Cimento CP IV	Material H	522	2296
Cimento LC ³	Material I	468	2500

Tabela C.4 – Distância material substituinte para melhorias ambientais

Tabela Distância	Fábrica	Emissão (kg CO ₂ /L)
Votorantim (Fábrica A)	34 Km	89,42 kgCO ₂
Siplan (Fábrica B)	37,6 Km	98,88 kgCO ₂

Tabela C.5 – Distância material substituinte para melhorias ambientais

Tabela Distância	Fábrica/usina	kgCO₂/t	Fornecedor
Material A (Areia reciclada)	44,8 Km	11,95	Martins Ambiental
Material B (Areia artificial)	34 Km	9,1	Votorantim
Material C (Pedrisco de seixo)	130 Km	34,67	Lemos areia e cascalho
Material D (Pedrisco RCD)	44,8 Km	11,95	Martins Ambiental
Material E (Pedrisco ARC)	6 Km	6,40	Original Blocos

Tabela C.6 – Distância material substituinte para melhorias ambientais aglomerante

Material F (CP II-E)	34 Km	9,1	Votorantim
Material G (CP III)	34 Km	9,1	Votorantim
Material H (CP IV)	34 Km	9,1	Votorantim
Material I (LC ³)	34 Km	9,1	Votorantim