

**USO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E TÉCNICAS DE ANÁLISE
DE INCERTEZAS EM PROJETOS RODOVIÁRIOS BRASILEIROS:
ESTUDO DE CASO COM DIFERENTES FONTES DE DADOS
AMBIENTAIS DO CIMENTO PORTLAND**

BRUNO VENDRAMINI DOS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E TÉCNICAS
DE ANÁLISE DE INCERTEZAS EM PROJETOS
RODOVIÁRIOS BRASILEIROS: ESTUDO DE CASO COM
DIFERENTES FONTES DE DADOS AMBIENTAIS DO
CIMENTO PORTLAND**

BRUNO VENDRAMINI DOS SANTOS

ORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO (DSc, UnB)

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO DE 2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E TÉCNICAS DE
ANÁLISE DE INCERTEZAS EM PROJETOS RODOVIÁRIOS
BRASILEIROS: ESTUDO DE CASO COM DIFERENTES FONTES
DE DADOS AMBIENTAIS DO CIMENTO PORTLAND**

BRUNO VENDRAMINI DOS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA,
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof. João Henrique da Silva Rêgo, Dr. (ENC-UnB)
(Orientador)**

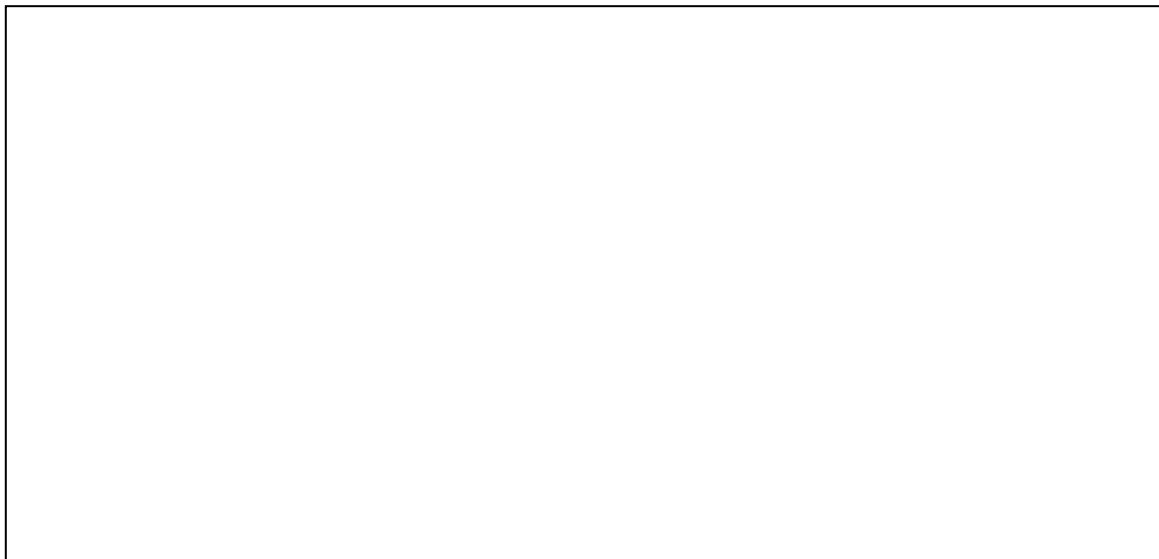
**Prof.^a Michele Teresa Marques Carvalho, Dra. (ENC-UnB)
(Examinadora Interna)**

**Prof. Francisco Javier Contreras Pineda, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador Externo ao Programa)**

**Prof. José Dinis Silvestre, PhD. (IST-Universidade de Lisboa)
(Examinador Externo à Instituição)**

BRASÍLIA/DF, 12 DE SETEMBRO DE 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, B. V. (2024). Uso da avaliação do ciclo de vida e técnicas de análise de incertezas em projetos rodoviários brasileiros: estudo de caso com diferentes fontes de dados ambientais do cimento portland. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-xxA/24, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 186 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Vendramini dos Santos.

TÍTULO: Uso da avaliação do ciclo de vida e técnicas de análise de incertezas em projetos rodoviários brasileiros: estudo de caso com diferentes fontes de dados ambientais do cimento Portland.

GRAU: Mestre ANO: 2024

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

Bruno Vendramini dos Santos
QI 23, Lote 14, Apartamento 222D, Guará 2, CEP: 71060-639, Brasília-DF, Brasil
E-mail: vendramini.bruno@gmail.com/bruno.vendramini@dnit.gov.br

*Dedico este trabalho à minha esposa, Leane,
amiga e companheira de todos os momentos, e
ao meu filho, Pedro Antônio.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Celina e Nilton, pela criação e todo o suporte concedido ao longo dos anos para minha formação e a de meus irmãos.

Aos amigos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em especial aos vinculados à Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP) e suas coordenações setoriais, pelos múltiplos incentivos e apoios concedidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos a todos vocês.

À Universidade de Brasília (UnB), pela oportunidade de aquisição de novos conhecimentos. Em particular, agradeço aos professores João Henrique, Valdirene, Michele Teresa, Cláudio, Jéssica e Edgar pelos ensinamentos e dedicação durante as disciplinas que cursei.

Aos amigos do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, pela troca de conhecimento e experiência ao longo desses dois anos de mestrado.

Agradecimento especial ao meu orientador, João Henrique, por todo o apoio, paciência e dedicação ao longo desses dois anos. Obrigado por ajudar a ampliar meus conhecimentos e por permitir meu enriquecimento pessoal e profissional.

Ao DNIT, pela oportunidade de afastamento para dedicação integral ao trabalho desenvolvido no mestrado.

Aos professores Michele Teresa, José D. Silvestre e Francisco Javier, por aceitarem compor a banca e contribuir com este trabalho.

À Votorantim Cimentos, em especial à Lidiane Oliveira, pela disponibilização do dado ambiental do cimento Portland produzido em sua unidade localizada no Distrito Federal.

À minha esposa, pela amizade e apoio incondicional em todos os desafios enfrentados, e ao meu filho, Pedro Antônio, um presente que recebemos em nossas vidas ao longo do período de mestrado.

“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança a força de sua alma, o universo passa a conspirar a seu favor.”

Johann Wolfgang von Goethe

RESUMO

USO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE INCERTEZAS EM PROJETOS RODOVIÁRIOS BRASILEIROS: ESTUDO DE CASO COM DIFERENTES FONTES DE DADOS AMBIENTAIS DO CIMENTO PORTLAND

Autor: Bruno Vendramini dos Santos

Orientador: João Henrique da Silva Rêgo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, setembro de 2024

O setor de transportes impulsiona o crescimento socioeconômico de muitos países, mas também gera consideráveis impactos ambientais. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), responsável pelas rodovias federais brasileiras, carece de ferramentas para avaliar e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de seus projetos, o que pode ser alcançado por meio da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Além disso, a escassez de dados ambientais de insumos-chave, como o cimento *Portland*, leva à utilização de bases de dados estrangeiras nos estudos de ACV realizados no Brasil, gerando incertezas nos resultados. O objetivo geral desta pesquisa é estabelecer uma metodologia que combine os conceitos de ACV, técnicas de análise de incertezas e as normas do DNIT para avaliar as emissões de GEE dos projetos das rodovias federais brasileiras, considerando as fases de produção de materiais, transporte e obra. O modelo desenvolvido na pesquisa foi aplicado em um projeto rodoviário do DNIT com pavimento rígido de concreto, avaliando a influência do uso de dados ambientais do cimento *Portland* local em comparação com seu equivalente produzido nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa sobre os resultados determinísticos e probabilísticos de emissões de GEE. Os resultados determinísticos indicam que a fase de produção de materiais é a mais impactante nas emissões globais do projeto, contribuindo com mais de 78% em todos os cenários. A fase de transporte representa mais de 16% das emissões globais. As disciplinas de pavimento novo e restaurado são as principais em termos de emissões unitárias, seguidas pela terraplanagem. A utilização de dados ambientais de cimentos estrangeiros resultou em aumentos de 7,31% (Europa) e 12,91% (EUA) nas emissões globais do projeto, com as diferenças mais significativas nas disciplinas de pavimentação. A análise probabilística mostrou que o uso do cimento brasileiro levou às menores emissões globais e incertezas entre os resultados dos três cenários. Entretanto, a abordagem probabilística dos cenários com o uso dos cimentos europeu e americano revelou que os parâmetros qualitativos dos dados ambientais de seus cimentos podem levar a resultados de emissões globais equivalentes, dependendo da faixa de probabilidade considerada na análise. A abordagem probabilística revelou ainda que o cimento *Portland* desempenha um papel crítico nos resultados do projeto integral e individualmente na maioria de suas disciplinas, mas essa criticidade pode ser alterada em função das propriedades qualitativas de seu dado ambiental. Em conclusão, a pesquisa oferece uma alternativa para estimar as emissões de GEE dos projetos das rodovias federais brasileiras, avaliando os efeitos da variação da origem dos dados ambientais de insumos-chave nos resultados, além de propor novas pesquisas para o avanço do tema no Brasil.

Palavras-chaves: Avaliação do ciclo de vida; incertezas; rodovias; cimento *Portland*; Brasil.

ABSTRACT

USE OF LIFE CYCLE ASSESSMENT AND UNCERTAINTY ANALYSIS TECHNIQUES IN BRAZILIAN HIGHWAY PROJECTS: A CASE STUDY WITH DIFFERENT SOURCES OF PORTLAND CEMENT ENVIRONMENTAL DATA

Author: Bruno Vendramini dos Santos

Advisor: João Henrique da Silva Rêgo

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, September of 2024

The transportation sector drives the socioeconomic growth of many countries, but it also generates considerable environmental impacts. In Brazil, the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT), responsible for federal highways, lacks tools to assess and mitigate greenhouse gas (GHG) emissions from its projects, which can be addressed through the Life Cycle Assessment (LCA) technique. Moreover, the scarcity of environmental data for key materials, such as Portland cement, leads to the use of foreign databases in LCA studies conducted in Brazil, generating uncertainties in the results. The general objective of this research is to establish a methodology that combines LCA concepts, uncertainty analysis techniques, and DNIT standards to evaluate GHG emissions from federal highway projects in Brazil, considering the material production, transportation, and construction phases. The model developed in the research was applied to a DNIT highway project using rigid concrete pavement, evaluating the influence of using environmental data from local Portland cement compared to its equivalent produced in the United States (USA) and Europe on the deterministic and probabilistic results of GHG emissions. The deterministic results indicate that the material production phase is the most impactful on the project's overall emissions, contributing over 78% in all scenarios. The transportation phase accounts for over 16% of the total emissions. The new and restored pavement disciplines are the main contributors to unit emissions, followed by earthworks. The use of environmental data from foreign types of cement resulted in increases of 7.31% (Europe) and 12.91% (USA) in the project's total emissions, with the most significant differences observed in the pavement disciplines. The probabilistic analysis showed that using Brazilian cement led to the lowest overall emissions and uncertainties among the three scenarios. However, the probabilistic approach for the scenarios using European and American types of cement revealed that the qualitative parameters of the environmental data for these types of cement can lead to equivalent overall emissions results, depending on the probability range considered in the analysis. The probabilistic approach also revealed that Portland cement plays a critical role in the project's overall and individual results for most disciplines, though this criticality can change based on the qualitative properties of its environmental data. In conclusion, the research provides an alternative to estimating GHG emissions from Brazilian federal highway projects, evaluating the effects of varying the origin of environmental data for key materials on the results, while also proposing further research for advancing the topic in Brazil.

Keywords: Life cycle assessment; uncertainties; highways; Portland cement; Brazil.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	3
1.2	OBJETIVOS.....	6
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	8
2.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM RODOVIAS.....	8
2.2.1	Histórico no setor rodoviário e conceitos básicos.....	9
2.2.2	Definição de objetivo e escopo.....	15
2.2.3	Análise de inventário do ciclo de vida.....	19
2.2.4	Avaliação de impacto do ciclo de vida e interpretação dos resultados.....	24
2.3	INCERTEZAS NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	27
2.3.1	Histórico de publicações e conceitos básicos.....	28
2.3.2	Tipos de incertezas e técnicas de análise.....	31
2.3.3	Técnica selecionada 1: Método indicadores de qualidade dos dados.....	38
2.3.4	Técnica selecionada 2: Método Monte Carlo.....	42
3	METODOLOGIA.....	57
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	57
3.2	VISÃO GERAL DO ESTUDO DE CASO.....	59
3.3	FASE 1 – DADOS DE ENGENHARIA.....	63
3.3.1	F1.a – Seleção do projeto de engenharia.....	63
3.3.2	F1.b – Organização das disciplinas de projeto em grupos.....	63
3.3.3	F1.c – Extração e tratamento dos dados do orçamento.....	64
3.3.4	F1.d – Fontes de energia e parâmetros de desempenho dos equipamentos.....	65
3.3.5	F1.e – Divisão dos dados de engenharia em fases de ACV.....	65
3.4	FASE 2 – DADOS AMBIENTAIS.....	72
3.4.1	F2.a – Seleção das fontes de dados ambientais.....	72
3.4.2	F2.b – Avaliação da qualidade e quantificação da incerteza dos dados ambientais	

3.5	FASE 3 – RESULTADOS DETERMINÍSTICOS.....	79
3.6	FASE 4 – RESULTADOS PROBABILÍSTICOS.....	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
4.1	QUALIDADE E INCERTEZA DOS DADOS AMBIENTAIS.....	87
4.2	RESULTADOS DETERMINÍSTICOS.....	91
4.2.1	Emissão total de CO ₂ equivalente.....	91
4.2.2	Emissão unitária de CO ₂ equivalente.....	99
4.3	RESULTADOS PROBABILÍSTICOS.....	103
4.3.1	Emissão unitária de CO ₂ equivalente e incerteza global.....	103
4.3.2	Análise de sensibilidade dos resultados.....	108
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
5.1	CONCLUSÕES.....	116
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
	APÊNDICES.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fluxograma da revisão bibliográfica do eixo temático ACV em rodovias.....	8
Figura 2.2 – Evolução do número de publicações anuais relacionadas a estudos de ACV em rodovias (período de referência: 01/1996 a 05/2024).....	10
Figura 2.3 - Sistema genérico de um pavimento rodoviário.....	11
Figura 2.4 – Fases e estrutura de uma ACV	12
Figura 2.5 – Exemplo de termos e definições-chave da ACV aplicados a um sistema de produção de concreto ¹	13
Figura 2.6 - Exemplo de países com fontes de dados ambientais públicas para estudos de ACV de rodovias ¹	20
Figura 2.7 - Consumo de energia em distintas fases do ciclo de vida de um pavimento com o emprego de distintas bases de dados	23
Figura 2.8 - Etapas da AICV com exemplos de categorias de impacto e indicadores de ponto médio (<i>midpoint</i>) e final (<i>endpoint</i>).....	25
Figura 2.9 - Evolução do número de publicações anuais relacionadas às incertezas na ACV (período de referência: 01/2006 a 05/2024)	27
Figura 2.10 - Evolução do número de publicações anuais relacionadas às incertezas na ACV (período de referência: 01/2006 a 05/2024)	28
Figura 2.11 - Representação simplificada dos tipos de incerteza em estudos de ACV.....	33
Figura 2.12 – Representação simplificada da relação entre as técnicas Método IQDs e MMC nos estudos de ACV	35
Figura 2.13 – Grade de linhas paralelas com dez agulhas lançadas aleatoriamente	42
Figura 2.14 - Probabilidade de X assumir valores no intervalo [a, b].....	44
Figura 2.15 - FDA de uma variável aleatória contínua	45
Figura 2.16 - Distribuição uniforme no intervalo [a, b]	46
Figura 2.17 - Função de distribuição beta com parâmetros (i) $\alpha = \beta$ e (ii) $\alpha \neq \beta$	47
Figura 2.18 - Distribuição normal	48
Figura 2.19 - Representação gráfica de $P(X \leq x_c)$ para uma variável aleatória com distribuição normal.....	49
Figura 2.20 - Distribuição normal padrão com indicação do IC (γ).....	50
Figura 2.21 – Etapas de construção de uma distribuição amostral.....	54
Figura 2.22 – Exemplificação dos resultados de uma simulação pelo MMC ¹ :	56

Figura 3.1 - Fluxograma do Modelo de ACV	58
Figura 3.2 - Mapa de localização do projeto da BR-080/DF ¹	60
Figura 3.3 - Diagrama linear com as soluções de pavimentação do projeto da BR-080/DF	61
Figura 3.4 - Estrutura básica de uma composição de custos do SICRO	67
Figura 3.5 – Estrutura básica do inventário do Modelo de ACV	68
Figura 3.6 – Exemplo demonstrativo do processo de classificação dos dados orçamentários em fases ACV: composição SICRO 4011533 — Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes — areia e brita comerciais	70
Figura 3.7 – Etapas do processo de avaliação da qualidade dos FEMs.....	75
Figura 3.8 – Fluxograma da Fase 3 do Modelo de ACV.....	79
Figura 3.9 – Fluxograma da Fase 4 do Modelo de ACV.....	83
Figura 3.10 – Campos do Modelo de ACV no Microsoft Excel.....	85
Figura 4.1 –Participação dos materiais mais relevantes para a emissão total de CO ₂ eq. e CoV correspondente: (a) cenário BR, (b) cenário EUR e (c) cenário EUA	89
Figura 4.2 - Contribuição das disciplinas na emissão total de CO ₂ eq. segundo fases ACV ¹	94
Figura 4.3 - Contribuição das fases de ACV na emissão total de CO ₂ eq. do projeto integral	97
Figura 4.4 - Contribuição das fases de ACV na emissão total de CO ₂ eq. das disciplinas de projeto (valores médios ¹).....	97
Figura 4.5 – Emissão unitária global de CO ₂ eq. dos cenários ¹	101
Figura 4.6 - Curvas de distribuição probabilidade de saída do Modelo de ACV do projeto integral dos cenários BR, EUA e EUR.....	104
Figura 4.7 – Resultados probabilísticos do Modelo de ACV dos cenários BR, EUR e EUA:	106
Figura 4.8 – Sensibilidade do Modelo de ACV do projeto integral dos cenários ¹	108
Figura 4.9 - Sensibilidade do Modelo de ACV da terraplanagem.....	110
Figura 4.10 - Sensibilidade do Modelo de ACV do pavimento restaurado dos cenários ¹	111
Figura 4.11 - Sensibilidade do Modelo de ACV do pavimento novo dos cenários	112
Figura 4.12 - Sensibilidade do Modelo de ACV da OAE dos cenários	113
Figura 4.13 - Sensibilidade do Modelo de ACV da drenagem/OAC dos cenários	114
Figura 4.14 - Sensibilidade do Modelo de ACV dos demais serviços dos cenários ¹	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –Termos e definições-chave da ACV	14
Tabela 2.2 - Exemplo de ferramentas utilizadas nos estudos de ACV de rodovias	17
Tabela 2.3 - Estudos de ACV de rodovias no Brasil com as fases e algumas das bases de dados ambientais consideradas	22
Tabela 2.4 – Principais termos usados na AICV	25
Tabela 2.5 - Exemplos de publicações: definição de conceitos de incertezas na ACV (Grupo 1) e sua aplicação nos estudos (Grupo 2)	30
Tabela 2.6 - Relação entre fases ACV, tipos de incerteza e técnicas para a sua avaliação ou redução.....	36
Tabela 2.7 - Estudos de ACV de rodovias com a quantificação e análise de incertezas.....	37
Tabela 2.8 - Matriz de qualidade dos dados (Matriz Pedigree).....	40
Tabela 2.9 - Parâmetros da FDP do tipo beta com base no IQD ¹	47
Tabela 3.1 – DMTs do projeto da BR-080/DF	61
Tabela 3.2 – FEE do Modelo de ACV.....	73
Tabela 3.3 – Fatores de emissão relativos à queima dos combustíveis puros nacionais.....	73
Tabela 3.4 – Misturas dos combustíveis comercializados no Brasil	74
Tabela 3.5 – FECs do Modelo de ACV ¹	74
Tabela 3.6 - Parâmetros da FDP do tipo beta com base no IQD ¹	77
Tabela 4.1 – Resultado da análise qualitativa dos FEMs dos materiais com as maiores contribuições na emissão total de CO ₂ eq. ¹	88
Tabela 4.2 – Emissão total de CO ₂ eq. segundo fases de ACV e cenários (em t CO ₂ eq.) .	92
Tabela 4.3 – Diferenças na emissão global de CO ₂ eq. dos cenários	92
Tabela 4.4 - Contribuição das disciplinas de projeto na emissão total de CO ₂ eq. segundo fases de ACV (valores normalizados em relação ao projeto integral)	93
Tabela 4.5 - Contribuição das fases de ACV na emissão total de CO ₂ eq. do projeto integral e de suas disciplinas.....	96
Tabela 4.6 - Emissão unitária de CO ₂ eq. segundo fases de ACV e cenários	100
Tabela 4.7 - Emissão unitária global de CO ₂ eq. dos cenários.....	100
Tabela 4.8 – Resultados probabilísticos parciais dos cenários BR, EUR e EUA ¹	103
Tabela 4.9 – Propriedades dos cimentos e aço CA-50 da disciplina de OAE ¹	113

Tabela A1 – Relação de materiais do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia).....	139
Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia).....	141
Tabela A3 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1.....	149
Tabela A4 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2.....	152
Tabela A5 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1.....	155
Tabela A6 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2.....	159
Tabela A7 - Emissão total dos materiais (FASE 3 – resultados determinísticos).....	161
Tabela A8 - Emissão total dos equipamentos (FASE 3 – resultados determinísticos).....	164
Tabela A9 – Resumo dos resultados determinísticos de emissão total (FASE 3 – resultados determinísticos)	168
Tabela A10 – Estatística das simulações do MMC do Modelo de ACV do cenário BR (FASE 4 – resultados probabilísticos)	169
Tabela A11 - Estatística das simulações do MMC do Modelo de ACV do cenário EUR (FASE 4 – resultados probabilísticos).....	170
Tabela A12 - Estatística das simulações do MMC do Modelo de ACV do cenário EUA (FASE 4 – resultados probabilísticos).....	171

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COP	Conferência das Partes
CO ₂ eq.	Dióxido de carbono equivalente
CoV	Coefficiente de variação
CoVg	Coefficiente de variação global
DAP	Declaração Ambiental do Produto
DMT	Distância Média de Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EE	Equação de emissão dos equipamentos
EM	Equação de emissão dos materiais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPL	Empresa de Planejamento e Logística
FDA	Função de distribuição acumulada
FDP	Função densidade de probabilidade
FEC	Fator de emissão da queima de combustíveis
FEE	Fator de emissão da geração de energia elétrica
FEM	Fator de emissão do material
GEE	Gases de efeito estufa
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IC	Intervalo de Confiança
ICV	Inventário do Ciclo de Vida

IQD	Indicador de qualidade dos dados
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPR	Instituto de Pesquisas em Transportes
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MMC	Método Monte Carlo
NDC	Contribuição Nacional Determinada
OAC	Obra de Arte Corrente
OAE	Obra de Arte Especial
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
PNL	Plano Nacional de Logística
PIB	Produto Interno Bruto
PPA	Plano Plurianual
RCPs	Regras de Categorias de Produtos
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SICV Brasil	Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros
SIDAC	Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
SIN	Sistema Interligado Nacional
TEMAC	Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado
TRACI	<i>Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts</i>
U.S EPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
US LCI	<i>U.S. Life Cycle Inventory Database</i>
VBA	<i>Visual Basic for Application</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transporte tem um papel crucial no desenvolvimento social e econômico de qualquer nação e deve ser planejada adequadamente para atender à crescente demanda por mobilidade de passageiros e cargas. O mercado global ligado à infraestrutura de transporte foi avaliado em 1,13 trilhões de dólares em 2022, com previsão de atingir 1,3 trilhões de dólares até 2030, crescendo a uma taxa anual de 2,06% (FBI, 2024). No Brasil, em um dos cenários simulados pelo Plano Nacional de Logística 2035 (PNL 2035), estima-se que sejam aplicados 1,2 trilhões de reais em obras de infraestruturas de transporte até 2035, com um retorno de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de 11% (EPL, 2021).

No entanto, o papel-chave do setor de transporte não se limita aos aspectos econômico e social, tendo um impacto significativo também sobre o meio ambiente. Estima-se que cerca de 25% das emissões globais de CO₂ sejam atribuídas ao setor de transporte, cuja taxa atual tem uma previsão de crescimento de 60% até 2050 caso não sejam tomadas medidas adequadas para conter a sua evolução (WBG, 2021). Outras publicações também indicam que, se não houver ações adicionais, as emissões do setor de transporte podem superar as projeções anteriores e, dessa forma, se tornar um grande obstáculo para evitar mudanças climáticas indesejáveis (Gota *et al.*, 2019; ITF, 2021; Minx *et al.*, 2021).

Segundo Diaz-Sarachaga *et al.* (2017), a influência do setor de transportes sobre o meio ambiente torna-se ainda mais relevante para as economias emergentes que planejam grandes investimentos para a expansão e manutenção das suas infraestruturas de transportes, como o Brasil. A matriz de transportes brasileira é dominada pelo modo rodoviário, com um total aproximado de 1,72 milhões de quilômetros de rodovias nos âmbitos federal, estadual e municipal. Desse total, aproximadamente 1,35 milhões de quilômetros são compostos por rodovias não pavimentadas (78,5%), e outros 157 mil quilômetros por rodovias planejadas (9,1%), que, somadas, representam um potencial aproximado de 1,5 milhões de quilômetros de vias a serem construídas e pavimentadas ao longo dos próximos anos no Brasil (DNIT, 2024a).

Além da margem de crescimento potencial da malha rodoviária brasileira, é importante considerar a existência de cerca de 65 mil quilômetros de rodovias pavimentadas no âmbito federal, com uma parcela significativa dessa malha viária apresentando níveis de serventia que demandam ações de manutenção cada vez mais intensas e robustas, o que inclui a substituição de parte dos ativos existentes por novos (Mello; Queiroz, 2017). Muitas dessas

intervenções, classificadas como estruturais, estão ligadas ao consumo de recursos naturais e a atividades industriais maiores do que as encontradas em manutenções funcionais ou de simples rotina, portanto com maior potencial de impacto negativo ao meio ambiente.

Em relação ao planejamento de médio prazo do governo brasileiro para o setor de transporte rodoviário, o Plano Plurianual da União para o período de 2024 a 2027 (PPA 2024-2027) prevê um investimento total de aproximadamente 66 bilhões de reais no setor, considerando recursos públicos e privados (Brasil, 2023a). Esses recursos estão direcionados à construção e adequação de cerca de 2,5 mil quilômetros de rodovias federais até 2027, bem como à melhoria progressiva das condições de trafegabilidade e segurança viária por meio da intensificação das ações de manutenção da malha rodoviária federal existente.

Entretanto, as emissões brutas de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil continuam aumentando, atingindo 2,4 bilhões de toneladas em 2021 (um aumento de 12,2% em relação a 2020), com o setor de transporte sendo um dos principais contribuintes, representando 203,8 milhões de toneladas de GEE (Potenza *et al.*, 2023; Bello *et al.*, 2023).

Nesse contexto, constata-se que o desafio a ser enfrentado pelo Brasil apresenta duas vertentes interligadas. A primeira refere-se à necessidade de ampliar e manter adequadamente a infraestrutura de transporte rodoviário, impulsionando setores econômicos cruciais para o desenvolvimento do país. A segunda vertente está relacionada às metas divulgadas pelo governo federal na 28.^a Conferência das Partes da Organização das Nações Unidas (MMA, 2023) e formalizadas na quarta edição da Contribuição Nacional Determinada (NDC) do Brasil (Brasil, 2023b) visando alcançar a neutralidade de emissões de GEE do país até 2050. Assim, o eixo central do desafio brasileiro consiste em conciliar os avanços impulsionados pela construção e manutenção das infraestruturas rodoviárias com os impactos negativos decorrentes sobre o meio ambiente (Santero; Masanet; Horvath, 2011a; Santos *et al.*, 2018a).

Nesse sentido, torna-se fundamental identificar alternativas que permitam conciliar o necessário desenvolvimento da infraestrutura rodoviária brasileira com a redução dos impactos ambientais. Uma possível solução reside na aplicação da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na gestão das rodovias do Brasil, oferecendo caminhos para alcançar esse equilíbrio de maneira eficiente e transparente.

1.1 MOTIVAÇÃO

Um número crescente de agências privadas e órgãos governamentais têm adotado princípios de sustentabilidade na gestão das suas atividades, mesmo que muitas vezes empregada de forma indireta ou informal (FHWA, 2015). No setor de transportes, a relevância da sustentabilidade é evidenciada pelo número de publicações científicas recentes que buscam avaliar os seus efeitos durante as fases de produção de matérias-primas, construção, manutenção, uso e fim de vida útil das infraestruturas viárias (Al Jassmi, 2019; Aryan; Dikshit; Shinde, 2023; Gouveia; Donato; da Silva, 2022; Hasan; Whyte; Jiang; Wu, 2019; Mattinzioli *et al.*, 2020; Martinho *et al.*, 2024; Santolini *et al.*, 2024; Suprayoga *et al.*, 2020).

A sustentabilidade pode ser representada por três elementos: as necessidades sociais, as econômicas e as ambientais (WCED, 1987). Essa última é a que demanda especial atenção no setor de transporte rodoviário, sendo a ACV a principal ferramenta de suporte às investigações ambientais (Suprayoga *et al.*, 2020).

Conceitualmente, a ACV permite avaliar a carga ambiental potencial de um produto ou processo, examinando todas as entradas e saídas ao longo do seu ciclo de vida, desde a produção dos materiais até o fim da sua vida útil. A sua base metodológica está distribuída em duas principais normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): ABNT NBR ISO 14040 (2014) e ABNT NBR ISO 14044 (2014). Dessa forma, a ACV não possui um campo de aplicação específico e requer um trabalho considerável no ciclo de uma rodovia, principalmente devido à necessidade de definir premissas e considerar condições específicas locais (Harvey *et al.*, 2016).

Na infraestrutura rodoviária, iniciativas sobre a inclusão de quesitos ambientais baseados nos conceitos da ferramenta ACV já podem ser observadas em contratações públicas, como na Suécia (TRAFIKVERKET, 2023), e avanços expressivos nesse mesmo sentido nos Estados Unidos da América (EUA) (FHWA, 2023). Esses exemplos destacam a viabilidade de aplicar a ACV em políticas públicas voltadas à gestão sustentável do modo rodoviário. Essas iniciativas também estão diretamente relacionadas ao volume de publicações científicas vinculadas aos países desenvolvidos, com destaque aos mencionados e a países como Canadá, Itália, Suíça, Inglaterra, Espanha, França e Austrália (Inyim *et al.*, 2016; Jiang; Wu, 2019).

Dentre os países em desenvolvimento, a China é o que apresenta o maior número de pesquisas sobre a avaliação do ciclo de vida em rodovias (Aryan; Dikshit; Shinde, 2023). Em contrapartida, o Brasil ainda possui um número reduzido de publicações voltadas ao seu próprio contexto, ou seja, estudos de ACV que considerem as especificações de dimensionamento de projetos, as matérias-primas, a tecnologia da indústria, a matriz energética e as outras variáveis ligadas à cadeia de construção, manutenção e operação de uma rodovia no país. Apesar disso, é possível notar progressos em pesquisas realizadas no Brasil nos últimos anos (Donato *et al.*, 2022; Graef *et al.*, 2021; Luvizão; Trichês, 2023; Mascarenhas *et al.*, 2022; Osorto; Casagrande, 2023; Pilger *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2022), incluindo um estudo concluído no tema dentro da linha de pesquisa “Gestão e Sustentabilidade na Construção Civil” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília – PECC/UnB (Hora, 2021).

Em relação aos estudos de ACV de rodovias conduzidos no Brasil, quatro características marcantes foram identificadas após a análise da bibliografia:

- a) emprego de dados ambientais de insumos internacionais, provavelmente pela carência de dados nacionais representativos e confiáveis, sobretudo de insumos como o aço, o cimento *Portland* e o cimento asfáltico de petróleo (CAP);
- b) utilização de ferramentas ou *softwares* estrangeiros como suporte aos cálculos de ACV, mesmo com o uso padrão de insumos e soluções de projetos que não atendem às especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), portanto que não refletem o tradicionalmente praticado nas rodovias brasileiras;
- c) ausência de análises voltadas à quantificação do grau de incerteza e sensibilidade dos resultados em função da qualidade dos dados ambientais dos insumos e das condições de contorno assumidas nos estudos, e
- d) predomínio de análises limitadas à comparação dos impactos ambientais de soluções de pavimento rígido e flexível, portanto sem englobar os impactos de outras disciplinas de projeto, como terraplanagem e Obras de Arte Especiais (OAEs). Isso resulta em avaliações parciais da carga ambiental até a fase de construção das rodovias brasileiras.

Já em relação às características dos projetos das rodovias brasileiras, é possível notar uma predominância de pavimentos com revestimentos flexíveis, compostos por agregados naturais e materiais betuminosos. Esse tipo de revestimento está presente em aproximadamente 97,5% da extensão total da malha rodoviária federal (DNIT, 2024a). No entanto, é notório um aumento na utilização de pavimentos rígidos de concreto de cimento *Portland* no Brasil, especialmente em alguns de seus principais corredores logísticos, conforme demonstrado abaixo (DNIT, 2024b):

- a) BR-101/NE (abrangendo os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) – obras em execução, com conclusão prevista para resultar em aproximadamente mil quilômetros de rodovia duplicada;
- b) BR-381/MG (segmento entre os municípios de Belo Horizonte/MG e Governador Valadares/MG) – obras finalizadas com extensão total de 66 km;
- c) BR-163/364/MT (segmento entre o município de Jaciara/MT e a Serra de São Vicente) – obras finalizadas com extensão total de 130 km;
- d) BR-163/SC (segmento entre os municípios de São Miguel do Oeste/SC e Dionísio Cerqueira/SC) – obras em execução com extensão total de 44 km;
- e) BR-262/MG (segmento entre o município de Realeza/MG e a divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo) – obras a iniciar com extensão total de 51 km;
- f) BR-135/MA (segmento entre os municípios de Itapecuru Mirim/MA e Miranda do Norte/MA) – obras a iniciar com extensão total de 32 km, e

Os empreendimentos listados anteriormente estão em andamento, tiveram suas obras finalizadas nos últimos cinco anos ou têm início programado pelo Novo Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC) (Brasil, 2024) para os próximos meses. Além de evidenciarem a recente tendência de uso de pavimentos rígidos de concreto nos principais corredores logísticos do Brasil, esses empreendimentos demonstram a relevância do cimento *Portland* como um dos principais materiais de construção dessas rodovias.

No entanto, o uso crescente do cimento *Portland* nas rodovias brasileiras traz consigo uma nova perspectiva ambiental. Globalmente, a produção de cimento é responsável por aproximadamente 27% das emissões de CO₂ do setor industrial, seguida pela produção de aço e ferro com 29% (IEA, 2023). No Brasil, apesar das emissões de carbono da indústria

de cimento *Portland* (572 kg CO₂/t cimento) serem inferiores à média mundial (611 kg CO₂/t cimento) (SNIC, 2022), o material ainda apresenta uma elevada carga ambiental decorrente da sua produção no contexto nacional. Além das emissões de CO₂ associadas à calcinação das matérias-primas, as emissões do cimento *Portland* nacional são causadas pelo elevado consumo de combustíveis não renováveis ao longo de sua cadeia produtiva, que, segundo o último Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2023a), foi de aproximadamente 62% do total de combustíveis consumidos pelo setor em 2022. Com base nessas características, o cimento *Portland* pode desempenhar uma função decisiva nos indicadores ambientais dos novos projetos rodoviários brasileiros com solução de pavimento rígido.

Dessa forma, considerando o cenário atual e as projeções para a malha rodoviária brasileira, bem como o papel-chave do setor de transportes na estratégia nacional de neutralidade climática, torna-se necessário investigar a aplicação da ferramenta ACV nos projetos rodoviários brasileiros. Para isso, deve-se considerar um projeto com pavimento rígido dimensionado conforme as especificações técnicas do DNIT, autarquia do governo federal responsável pela administração direta das rodovias federais brasileiras e pelo estabelecimento das principais normas técnicas para projetos de infraestrutura de transportes no país.

Além disso, deve-se avaliar as consequências em termos de incerteza dos resultados de ACV a partir da qualidade dos dados ambientais utilizados nos estudos, o que pode ser alcançado com o emprego de técnicas de análise de incertezas (Azarijafari; Yahia; Amor, 2018; Gregory *et al.*, 2016; Groen *et al.*, 2017; Yu; Wang; Gu, 2018). Sob essa perspectiva, considerando ainda o ganho de relevância do cimento *Portland* nos projetos das rodovias federais brasileiras e as diferenças nas emissões de CO₂ resultantes da produção desse material no Brasil e no exterior, é necessário analisar os efeitos da variação da origem dos dados ambientais do cimento *Portland* nos resultados de ACV.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é estabelecer uma metodologia que combine os conceitos de ACV, técnicas de análise de incertezas e as normas do DNIT para avaliar as emissões de GEE dos projetos das rodovias federais brasileiras, considerando as fases de produção de material, transporte e obra.

Como objetivos específicos, podem ser enumerados:

- a) aplicar o Modelo de ACV proposto pela metodologia desta pesquisa em um projeto rodoviário do DNIT com pavimento rígido de concreto de cimento *Portland*;
- b) analisar a influência do uso de dados ambientais de cimento *Portland* local em comparação com o equivalente produzido nos EUA e na Europa sobre os resultados de emissões de GEE do projeto selecionado, e
- c) avaliar a contribuição individual das disciplinas e insumos nos resultados de emissões de GEE do projeto selecionado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Este capítulo, de introdução, apresenta a relevância do tema, as lacunas de conhecimento, o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando os princípios gerais ligados ao uso da avaliação do ciclo de vida em rodovias. Na mesma seção são destacadas considerações sobre as incertezas nos estudos de ACV e como elas podem ser classificadas e quantificadas.

O terceiro capítulo aborda a metodologia, destacando as premissas utilizadas para a seleção do projeto de engenharia do DNIT. Adicionalmente, descreve as etapas do Modelo de ACV desenvolvido, usado para calcular os resultados determinísticos e probabilísticos de emissões de GEE do projeto selecionado. O capítulo também detalha as técnicas de análise de incerteza adotadas e explica como elas foram aplicadas no contexto de cada etapa da metodologia.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

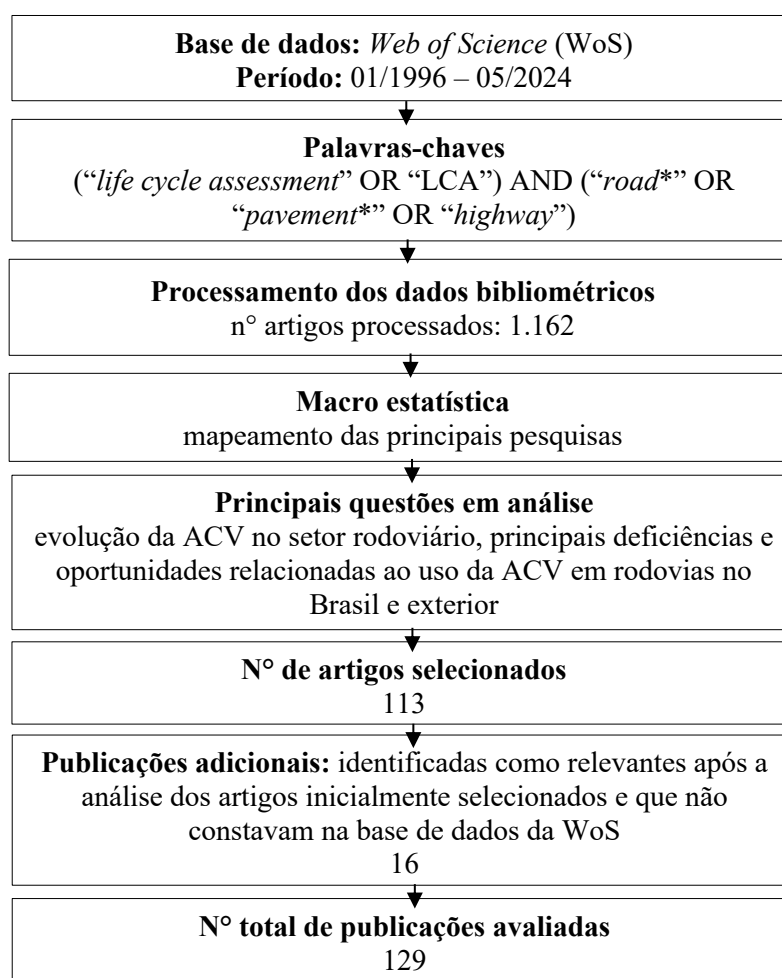
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A revisão bibliográfica desta pesquisa foi dividida em dois eixos temáticos: avaliação do ciclo de vida em rodovias e incertezas na avaliação do ciclo de vida. Para conduzir o estudo utilizou-se a metodologia denominada “Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC)” (Mariano; Rocha, 2017) e o pacote Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017), programado em linguagem R, como ferramenta de suporte para o tratamento, análise dos dados bibliométricos e seleção das publicações.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM RODOVIAS

A Figura 2.1 detalha o fluxograma utilizado para a revisão bibliográfica do eixo temático de avaliação do ciclo de vida em rodovias.

Figura 2.1 Fluxograma da revisão bibliográfica do eixo temático ACV em rodovias



Fonte: Autor.

A base de dados utilizada neste estudo foi a *Web of Science* (WoS), escolhida devido à abrangência de periódicos contidos na sua plataforma. A delimitação temporal compreendeu o período de janeiro de 1996 a maio de 2024, com a seleção de categorias e áreas de estudo alinhadas ao desta pesquisa. Após a seleção inicial dos 1.162 artigos, procedeu-se ao processamento dos dados para obter uma visão geral do comportamento das linhas de pesquisa ao longo do período estabelecido, permitindo a identificação dos principais autores, instituições e artigos da área. Após isso, tendo como orientação as principais questões de análise detalhadas na Figura 2.1, 113 artigos foram separados e integralmente analisados. Adicionalmente, foram selecionadas outras 16 publicações, distribuídas entre instituições de ensino superior, centros especializados e organizações públicas e privadas, consideradas relevantes para a pesquisa e não presentes na base de dados da WoS. Dessa forma, um total de 129 publicações foram selecionadas e avaliadas nesse primeiro eixo temático.

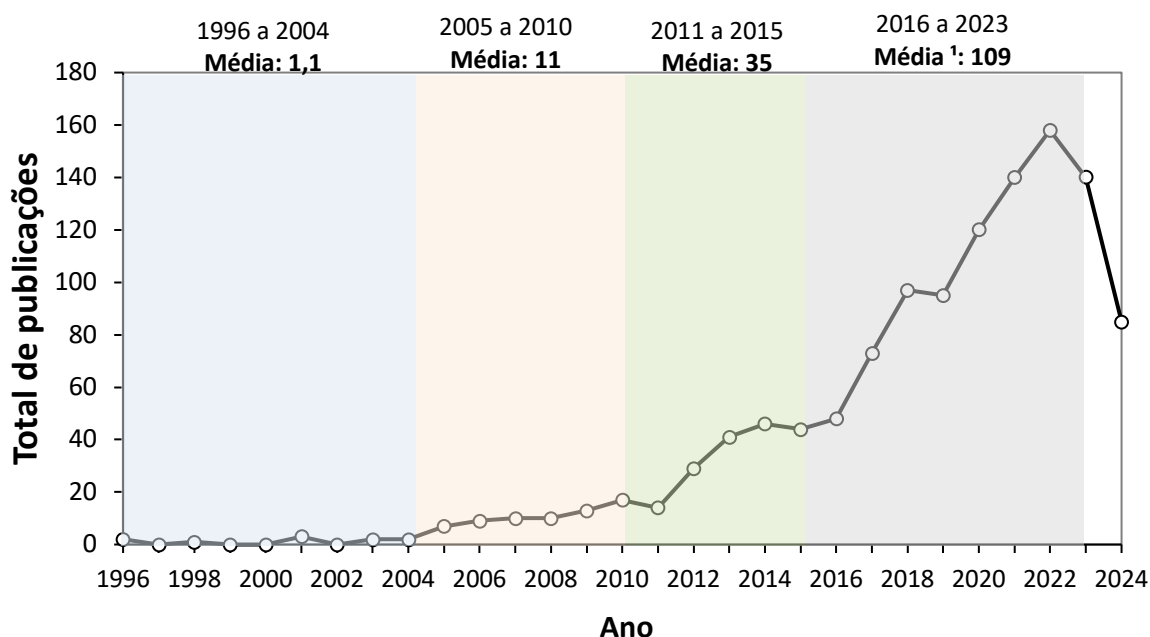
2.2.1 Histórico no setor rodoviário e conceitos básicos

Os primeiros registros de estudos relacionados à aplicação da ferramenta ACV no setor rodoviário remontam ao final da década de 1990, com publicações de temas que abrangeram a análise de padrões de combustíveis com baixo teor de carbono para veículos rodoviários (Eriksson; Blingeb; Liivgren, 1996); exame de redes de transporte (Pereira; Blanc; Coste, 1998); análise da construção de pavimentos com o emprego de diferentes tipos de materiais (Mroueh; Eskola; Laine-Ylijoki, 2001); avaliação de tipos de ligantes asfálticos e produção de cimento (Berthiaume; Bouchard, 1999; Häkkinen; Mäkelä, 1996; Horvath; Hendrickson, 1998), e o desenvolvimento de inventários ligados aos principais insumos rodoviários (Stripple, 2001).

Contudo, as primeiras investigações da bibliografia revelaram que as pesquisas não apresentavam uma uniformidade em termos de definição de indicadores, quantificação e avaliação objetiva dos impactos ambientais causados pelas distintas fases do ciclo de vida de uma rodovia. Esses apontamentos foram realizados inicialmente por Santero, Masanet e Horvath (2011a, 2011b), que conduziram uma das primeiras e mais completas revisões da literatura sobre os impactos ambientais de rodovias com base na metodologia dada pela série de normas da *International Organization for Standardization* (ISO): ISO 14040 (2006a) e ISO 14044 (2006b), contemplando o período compreendido por 1996 e 2010. Outras importantes e mais recentes publicações foram efetuadas sobre o tema ao longo dos anos, também como revisão da literatura (Anthonissen; Van Den Bergh; Braet, 2016; Aryan;

Dikshit; Shinde, 2023; Azarijafari; Yahia; Ben Amor, 2016; Hasan; Whyte; Al Jassmi, 2019; Inyim *et al.*, 2016). A evolução do número de publicações científicas associadas ao uso da ACV no setor rodoviário está representada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Evolução do número de publicações anuais relacionadas a estudos de ACV em rodovias (período de referência: 01/1996 a 05/2024)

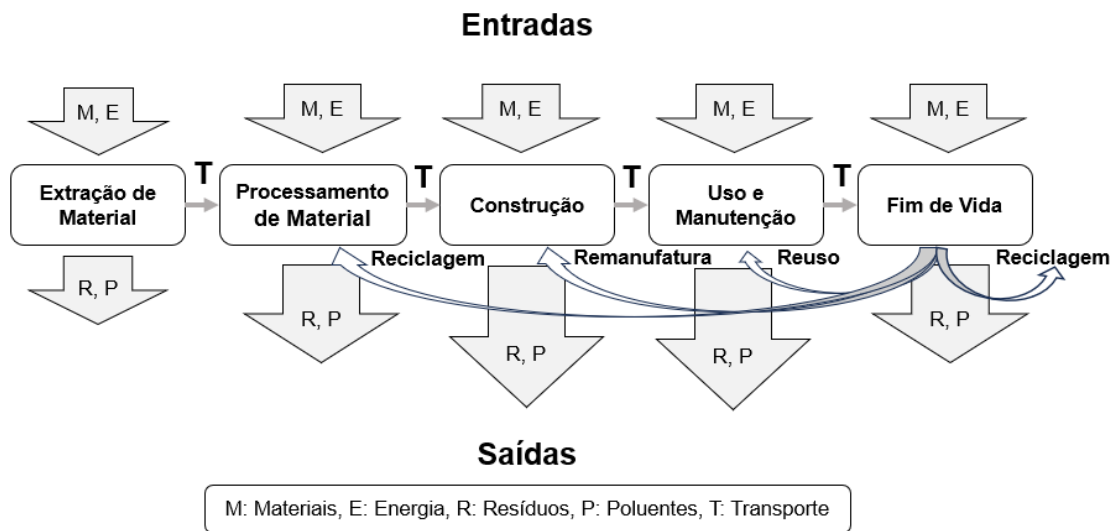


Nota ¹ Os dados relativos a 2024 não foram contabilizados por representarem uma fração do ano.
 Fonte: *Web of Science*.

Utilizando as médias das publicações anuais entre os anos de 1996 e 2023, é possível organizar a evolução dos estudos de ACV no setor rodoviário em quatro grupos. A Figura 2.2 revela um baixo volume de estudos publicados entre os anos de 1996 e 2004, possivelmente devido à fase de desenvolvimento e harmonização dos métodos de ACV ocorrida nesse período (Guinée *et al.*, 2011). De 2005 a 2010, período no qual a série de normas ISO 14040 foi lançada, constata-se um aumento na média anual de publicações. No entanto, é a partir do terceiro período (2011 a 2015) que as publicações ganham mais destaque, provavelmente impulsionadas pelas iniciativas globais relacionadas às metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris, acordado pelos países signatários da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) (Brasil, 2017). Do total de publicações processadas (1.162), 24% estão associadas aos EUA, 25% à China, 41% aos países da Europa e os restantes 10% distribuídos principalmente entre países como Brasil, Índia, Austrália e Canadá.

Já em relação aos conceitos básicos, é possível definir a ACV como uma ferramenta que permite compilar e avaliar as entradas, saídas e os potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. As entradas englobam a medição do consumo de materiais e energia, enquanto as saídas consistem em fluxos de produtos, subprodutos e emissões para o ar, água, solo, entre outros (Oliveira *et al.*, 2021). A Figura 2.3 apresenta um sistema genérico de um pavimento rodoviário em vários estágios do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas da natureza até o fim da sua vida útil.

Figura 2.3 - Sistema genérico de um pavimento rodoviário



Fonte: Adaptado de Kendall (2012).

Os fluxos de entrada e saída da Figura 2.3 compõem o inventário do ciclo de vida do sistema representado. O levantamento desses fluxos permite identificar quais estágios do ciclo de vida do pavimento têm uma contribuição negativa mais significativa para o meio ambiente. Com o inventário consolidado, as saídas dos fluxos podem ser associadas a categorias de impacto e a indicadores ambientais, e suas potenciais implicações na saúde humana e consequências ecológicas podem ser interpretadas. Dessa forma, é possível avaliar melhorias ou considerar a implementação de outras soluções de engenharia nos seus diversos estágios, além de alternativas para o destino dos materiais após o fim da vida útil da infraestrutura (Kendall, 2012).

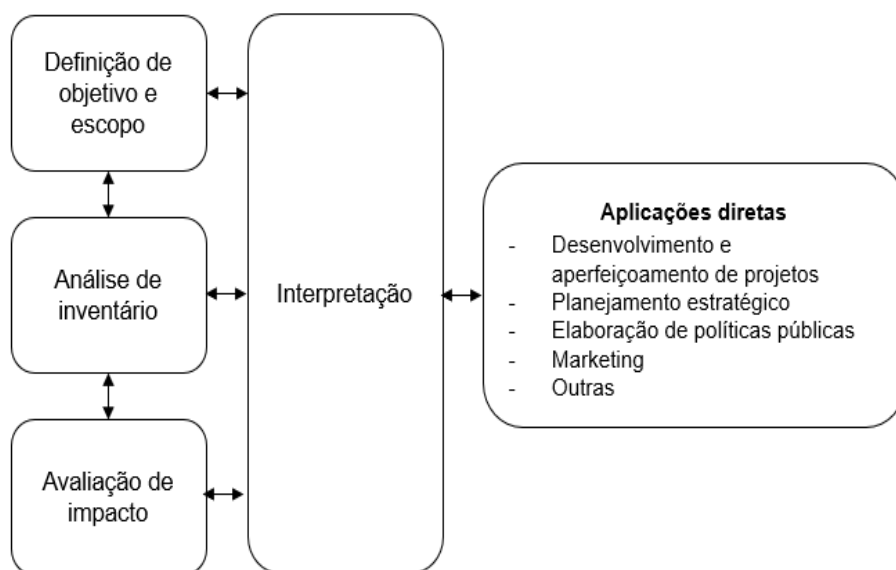
Nesse contexto, observa-se que a ACV pode ser empregada em sistemas que abrangem o ciclo de vida completo de um produto. No entanto, devido às limitações como recursos financeiros e atributos qualitativos dos dados disponíveis, bem como às metas e objetivos estabelecidos previamente, a ACV também pode ser aplicada a estágios selecionados do

ciclo de vida de uma rodovia (Harvey *et al.*, 2016). Conforme a norma ISO/TS 14048 (2020), essa flexibilidade pode se manifestar em diferentes tipos de escopo de estudos de ACV:

- Do berço ao túmulo (*creadle-to-grave*): envolve a extração do recurso da natureza até a disposição final do produto, ou seja, contempla todas as fases do ciclo de vida.
- Do berço ao portão (*creadle-to-gate*): escopo que considera o processo que começa com a extração de recursos da natureza, podendo incluir alguma fabricação ou operações de serviço, mas excluindo todas as etapas subsequentes.
- Do portão ao portão (*gate-to-gate*): processo onde todas as etapas de produção ocorrem em um único local. O local pode ser especificado geograficamente ou, no caso de dados genéricos, a especificação geográfica pode ser mais geral.
- Do portão ao túmulo (*gate-to-grave*): processo que inclui a distribuição, a utilização e a destinação final do produto.

Como mencionado anteriormente, o processo de avaliação de impacto ambiental baseado na ACV é governado pela série de normas da ISO (14040 e 14044), incorporadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio das normas ABNT NBR ISO 14040 (2014) e ABNT NBR ISO 14044 (2014). Para essas referências normativas, e como apresentado na Figura 2.4, um estudo de ACV é composto por quatro principais fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados.

Figura 2.4 – Fases e estrutura de uma ACV

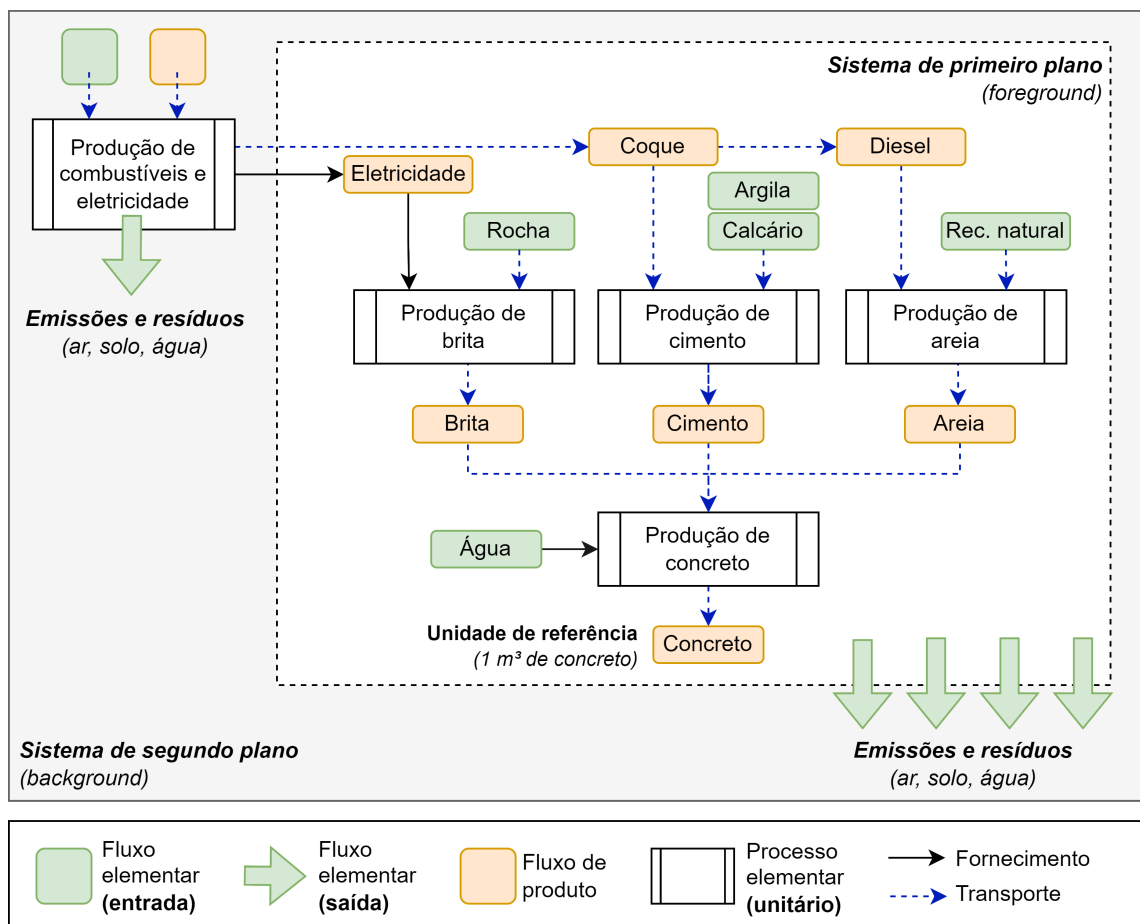


Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 14040 (2014).

A Figura 2.4 destaca que a ACV é uma técnica iterativa, onde as fases individuais utilizam os resultados das outras fases. Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (2014), essa abordagem iterativa, tanto dentro de cada fase quanto entre as fases, contribui para a completude e consistência dos estudos e resultados.

A série de normas da ISO 14040 não especificam uma aplicação pretendida da ACV, deixando a definição dessa aplicação para a fase de objetivo e escopo de cada estudo. Ainda assim, além das quatro fases apresentadas na Figura 2.4, algumas definições e termos gerais são comuns aos estudos de ACV, independentemente de estarem relacionados ao setor de transporte rodoviário ou não. Os termos e definições-chave da ACV que fornecem o embasamento necessário para o desenvolvimento da metodologia desta pesquisa estão ilustrados na Figura 2.5 e conceituados na Tabela 2.1.

Figura 2.5 – Exemplo de termos e definições-chave da ACV aplicados a um sistema de produção de concreto ¹



Nota ¹ Esta representação esquemática é uma simplificação do sistema de produção do concreto, com escopo delimitado por alguns dos processos elementares contidos no estágio “do berço ao portão”. Existem outros insumos, fluxos e processos envolvidos na cadeia de produção do concreto.

Fonte: Baseado em Belizario-Silva *et al.* (2022)

Tabela 2.1 – Termos e definições-chave da ACV

Termo	Definição
Fluxo elementar (entrada e saída)	Material ou energia retirados do meio ambiente e que entra no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou material ou energia liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana.
Fluxo de produto	Entrada ou saída de produtos provenientes ou destinados a um outro produto.
Fronteiras ou limites do sistema	Conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto. Podem ser estabelecidas em diversas dimensões: geográfica, temporal, tecnológica, entre outras.
Sistema de produto	Conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produtos, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto.
Sistema de primeiro plano (<i>foreground</i>)	Contém processos que podem ser influenciados ou modificados pelo responsável pelo produto, portanto com atividade ligadas diretamente ao ciclo de vida do produto.
Sistema de segundo plano (<i>background</i>)	Contém processos que geralmente não são controlados pelo responsável pelo produto, como os atrelados à geração de eletricidade pública e produção de combustíveis.
Produto	Qualquer bem (p.ex.: materiais e equipamentos de construção) ou serviços (p.ex.: transportes dos materiais de construção).
Processo elementar ou unitário	Menor elemento considerado na análise de inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados.
Unidade funcional	Unidade de referência para a qual os resultados de uma ACV são relacionados, fornecendo uma referência para a qual os dados de entrada e saída são normalizados. Define as funções do produto com as suas características de desempenho. As comparações entre sistemas de produtos só podem ser feitas para resultados expressos na mesma unidade funcional.
Unidade declarada	Quantidade de um produto a ser utilizada como unidade de referência em uma declaração ambiental de produto baseada em ACV. Portanto, a unidade declarada não está associada a parâmetros de desempenho do produto.

Fonte: Baseado em ABNT NBR ISO 14040 (2014); ABNT NBR ISO 14044 (2014) e ISO 21930 (2017)

Apesar dos recentes avanços em termos de pesquisas sobre a aplicação da ferramenta de ACV no setor de transportes e de alguns programas governamentais que demonstram o seu potencial uso em políticas públicas (TRAFIKVERKET, 2023; FHWA, 2023), ainda há uma série de questões levantadas pela bibliografia sobre como implementá-la nesse setor de forma consistente para a tomada de decisão. Dessa forma, as próximas seções serão dedicadas ao detalhamento das principais constatações da literatura sobre a aplicação da

ACV no setor rodoviário, tendo como referência as quatro fases do estudo de ACV indicadas pela ABNT NBR ISO 14040 (2014).

2.2.2 Definição de objetivo e escopo

Os princípios metodológicos associados à etapa de objetivo e escopo incluem definições como a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, público-alvo, dados e os seus requisitos, fronteira do sistema, unidade funcional, procedimentos de alocação, metodologia de avaliação dos impactos, tipos de impacto e limitações do estudo (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

Os objetivos vinculados aos estudos de ACV de rodovias são diversificados, sendo que são tipicamente realizadas análises comparativas entre pavimentos rígidos (cimento *Portland*) e flexíveis (cimento asfáltico de petróleo), a exemplo dos trabalhos desenvolvidos por Kucukvar e Tatari (2012); Batouli, Bienvenu e Mostafavi (2017); Boonpoke *et al.* (2018); Nascimento *et al.* (2020) e Aryan, Kumar e Mohan (2024). Dos 113 artigos inicialmente analisados, 23 (20%) tiveram no seu escopo esse tipo de análise comparativa. Outras pesquisas ficaram concentradas na investigação dos impactos ambientais causados pelo emprego de diferentes tipos de materiais, a maioria para reduzir o consumo de cimentos, agregados naturais ou insumos asfálticos (Anastasiou; Liapis; Papayianni, 2015; Chen; Wang, 2022; Osorto; Casagrande, 2023; Plati; Tsakoumaki, 2023; Selvam *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2024; Martinho *et al.*, 2024; Santolini *et al.*, 2024).

Alguns estudos realizaram a avaliação conjunta de impactos ambientais com aspectos econômicos e sociais, um tipo de abordagem relativamente recente e pouco representativa na amostra de publicações consultadas (Choi *et al.*, 2016; Rocha *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2019). Nessa temática, a pesquisa desenvolvida por Ostovar (2023) é um destaque ao explorar o emprego combinado da ACV com aspectos econômicos e sociais em três estudos de casos, com a proposição de modelos para o emprego da metodologia desenvolvida em situações reais de gestão de infraestruturas rodoviárias. Santos *et al.* (2018a), por sua vez, avaliaram os impactos ambientais de diferentes planos de manutenção e restauração de pavimentos, mas englobando ao escopo do estudo apenas a combinação com aspectos econômicos. Os estudos conduzidos por Umer *et al.* (2017), Batouli *et al.* (2017), Hong e Prozzi (2018), Zhong *et al.*, 2024 e Li *et al.*, 2024 também demonstram a combinação da metodologia ACV com aspectos econômicos na análise de diferentes soluções de pavimentação, cenários de intervenção ou uso de materiais alternativos em pavimentos.

Associada à fase de definição de escopo e objetivo, a unidade funcional é de fundamental importância para a análise dos resultados de ACV de rodovias, pois fornece o parâmetro de desempenho das infraestruturas que integram as rodovias, logo, deve ser uma propriedade mensurável e comparável (Harvey *et al.*, 2016). Diferentes unidades funcionais foram utilizadas nos artigos pesquisados: extensão linear-faixas de rolamento (Plati; Tsakoumaki, 2023); área de plataforma (Chen *et al.*, 2021); extensão linear e volume médio anual de veículos (Jullien; Dauvergne; Cerezo, 2014), e parâmetros de desempenho do pavimento como a sua irregularidade longitudinal e deformação permanente (Santos *et al.*, 2018b; Xu *et al.*, 2019). A unidade funcional “extensão linear-faixas de rolamento” foi a mais empregada pelos autores, principalmente para a fase de construção. Contudo, percebe-se que a ausência de uniformização em relação às unidades funcionais empregadas nas pesquisas selecionadas impossibilita a análise comparativa dos resultados, corroborando observações feitas a esse respeito por alguns dos autores consultados (Santero; Masanet; Horvath, 2011a; Xu *et al.*, 2019).

A fase de escopo de um estudo de ACV responde também pela definição do sistema de análise, a exemplo do estabelecimento de limites geográficos e temporais, assim como requisitos de qualidade dos dados para a realização do estudo. Em relação a esse último, não é frequente a caracterização de parâmetros qualitativos dos dados ambientais utilizados nos estudos de ACV de rodovias, bem como a análise da influência das incertezas inerentes a esses dados de entrada nos resultados (Aryan; Dikshit; Shinde, 2023). De toda forma, a literatura esclarece que definições relacionadas à fase de objetivo e escopo são influenciadas pela disponibilidade e qualidade dos dados ambientais disponíveis (Alam; Hossain; Bazan, 2022). Orientações para a seleção e tratamento das incertezas dos dados de inventário das principais fases do ciclo de vida das infraestruturas viárias são abordadas na literatura, com ênfase especial na fase de produção dos materiais de pavimentação (Abed *et al.*, 2023; Harvey *et al.*, 2016).

Ao longo dos últimos anos diversas ferramentas de ACV foram desenvolvidas, com sistemas de análise previamente delimitados e com muitos conjuntos de dados ambientais. A Tabela 2.2 apresenta algumas das principais ferramentas citadas nos estudos consultados, a partir da qual se observa que as ferramentas de apoio aos estudos de ACV de rodovias estão concentradas em países da América do Norte (EUA e Canadá) e Europa. Contudo, muitas dessas ferramentas não são utilizadas pelas entidades ligadas ao setor de transportes por possuírem sistemas com limites muito amplos e que não refletem as situações reais ligadas

às etapas de dimensionamento de projeto, construção, manutenção e operação das rodovias (Mattinzioli *et al.*, 2021).

Tabela 2.2 - Exemplo de ferramentas utilizadas nos estudos de ACV de rodovias

<i>Software</i>	Desenvolvedor e país de origem		Acesso	Tipo de projeto	Fase ACV	Normas de engenharia	Dados ambientais
MOVES	U.S. EPA	EUA	Gratuito	Tráfego	T, U	Nacional	Nacional
INVEST	FHWA	EUA	Gratuito	Rodovia	M, T, C, R, U	Nacional	Nacional
BREEAM Infrastructure	BREEAM	UK Irlanda	Pago	Rodovia Aeroporto Ferrovia	M, T, C, R, U	Nacional Internacional	Nacional Internacional
PaLATE	UC Berkeley	EUA	Gratuito	Rodovia	M, T, C, R, U	Nacional	Nacional
LCA Pave Tool	FHWA	EUA	Gratuito	Rodovia	M, T, C	Nacional	Nacional
Athena Pavement LCA	Athena Institute	Canadá EUA	Gratuito	Rodovia	M, T, C, R, U, F	Nacionais	Nacionais
SimaPro	PRé Sustainability	Países Baixos	Pago	Diversos	M, T, C, R, U, F	Diversos	Diversos
OpenLCA	GreenDelta	Alemanha	Gratuito	Diversos	M, T, C, R, U, F	Diversos	Diversos
Carbon Gauge	TAGG ¹	Austrália Nova Zelândia	Gratuito	Rodovia	M, T, C, R, U	Nacionais	Nacionais Internacional
asPECT	TRL	UK	Gratuito	Pavimento flexível	M, T, C, R, F	Nacional	Nacional Internacional

Acrônimos: M – extração de matérias-primas e produção dos materiais; T – transportes; C – construção das obras; R – reparo e manutenção; U – uso/operação da vida; F- fim de vida. Nota ¹ *Transport Authorities Greenhouse Group Australia and New Zealand*.

Fonte: Autor.

A Tabela 2.2 também evidencia que muitas das ferramentas utilizam dados ambientais e normas de engenharia afetos ao seu país de origem, apesar de algumas delas permitirem modificações nas suas premissas técnicas ou bases de dados originais, a exemplo dos *softwares* Athena Pavement LCA (Athena, 2018) e Carbon Gauge (Dilger *et al.*, 2013).

Além disso, a análise individualizada dos *softwares* com acesso gratuito demonstra que as suas bases metodológicas requerem, antes de qualquer cálculo ambiental, a descrição dos itens de serviço — com a seleção de equipamentos, materiais e os seus respectivos quantitativos — necessários à execução das obras, ou seja, as mesmas rotinas básicas para a elaboração de um orçamento de engenharia. Portanto, o principal diferencial dessas

ferramentas de ACV é que elas agregam às tradicionais regras de orçamentação dados ambientais e metodologias de impacto ambiental. Isso fica evidente em ferramentas que analisam de forma conjunta os aspectos econômicos e ambientais das rodovias, como a INVEST (Reid *et al.*, 2018) e a LCA Pave Tool (Meijer *et al.*, 2021).

No Brasil, a principal referência metodológica para o desenvolvimento de orçamentos em infraestruturas de transportes é o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) (DNIT, 2024c). Além de estabelecer regras de orçamentação, o SICRO também atende às especificações do Instituto de Pesquisas em Transportes do DNIT (IPR/DNIT) (DNIT, 2024d) em termos de dimensionamento de projetos e execução de serviços rodoviários, além de disponibilizar na sua base de dados detalhes quanto ao tipo de combustível e o seu consumo médio pelos diversos equipamentos empregados na execução das obras. Em função dessas especificidades, o SICRO pode ser uma alternativa para o desenvolvimento de uma base de cálculo dos estudos de ACV das rodovias federais brasileiras.

As publicações de ACV de rodovias apresentam variações significativas em termos de período e fases do ciclo de vida dos estudos, quesitos que também devem ser definidos na etapa de definição de escopo e objetivo. Em determinadas situações, pesquisas com escopos e objetivos semelhantes possuem períodos de análise significativamente distintos, como as pesquisas desenvolvidas por Mascarenhas *et al.* (2022) e Chen e Wang (2018). Apesar de contemplarem as mesmas fases do ciclo de vida da rodovia, essas pesquisas realizam investigações para intervalos de vida útil das estruturas de 20 e 40 anos, respectivamente. É possível identificar também estudos com a presença de sistemas que consideram uma única fase (Yu; Lu, 2014) ou todas as fases do ciclo de vida de uma rodovia (Zhang *et al.*, 2010).

Dos 113 artigos inicialmente selecionados, 96 (85%) abordam as fases que englobam a extração de matérias-primas da natureza, produção de materiais, transporte, construção, manutenção ou fim de vida útil. No entanto, apesar de ser reconhecida como uma das principais fontes de emissão de GEE (Santero; Masanet; Horvath, 2011b), a fase de uso foi considerada em apenas 17 (15%) estudos (Alam; Hossain; Bazan, 2022; Araújo; Oliveira; Silva, 2014; Jiang *et al.*, 2020; Loijos; Santero; Ochsendorf, 2013; Noshadravan *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2018b; Santos; Ferreira; Flintsch, 2015a, 2015b; Treloar; Peter E.D.; Crawford, 2004; Wang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2019; Yu; Lu, 2012; Yu; Lu; Xu, 2013; Zhang *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2019; Ziyadi *et al.*, 2018; Farina; Kutay; Anctil, 2024).

2.2.3 Análise de inventário do ciclo de vida

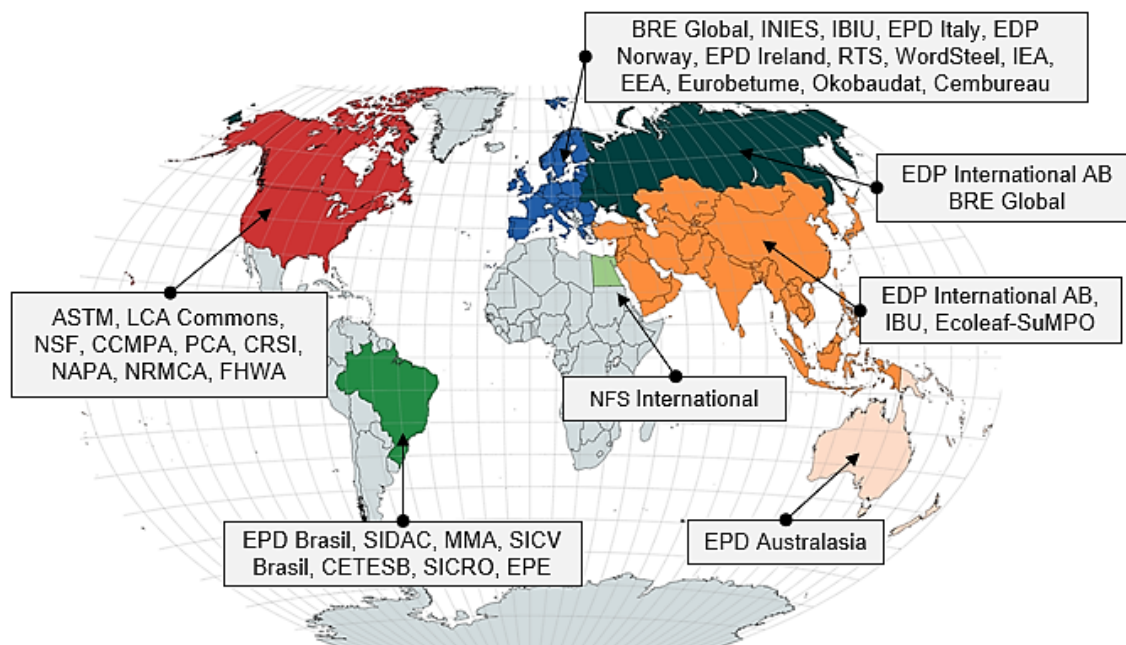
A segunda etapa da ACV é a análise de inventário do ciclo de vida (ICV). A ABNT NBR ISO 14040 (2014) esclarece que nessa fase devem ocorrer a coleta de dados e a definição dos procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de informações classificadas como relevantes para um determinado sistema. Os dados associados aos processos de um sistema podem ser classificados da seguinte forma: a) entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas; b) produtos, coprodutos e resíduos; c) emissões atmosféricas, descargas para a água e solo, e d) outros aspectos ambientais.

As bases de dados ambientais empregadas nos estudos de ACV de rodovias são diversificadas, sendo que para algumas fases (como as de extração de matéria-prima da natureza e produção dos materiais) há uma maior diversidade de fontes disponíveis, a exemplo das provenientes de entidades públicas e privadas (ASTM INTERNATIONAL, 2023; CRSI, 2022; EUROBITUME, 2020; PCA, 2023), e das publicações da própria literatura (Rosado *et al.*, 2017; Stripple, 2001); enquanto para a fase de operação é comum o uso de dados ambientais advindos de modelos de cálculo, a exemplo da quantidade total de CO₂ equivalente (CO₂ eq.) emitida na atmosfera pelos veículos automotores, inclusive com variações em função das condições funcionais do pavimento ao longo do tempo (Santos *et al.*, 2018b), e do efeito albedo causado pelos pavimentos (Yu; Lu, 2014). A Figura 2.6 fornece uma visão geral das principais fontes de bancos de dados ambientais com acesso gratuito, tanto nacionais quanto internacionais, que podem subsidiar estudos de ACV em rodovias.

Para o contexto brasileiro, constatou-se uma limitada disponibilidade de dados ambientais associados à produção dos principais insumos empregados nos serviços rodoviários. Contudo, é possível notar fontes nacionais públicas que possuem dados ambientais relativos à produção de materiais autodeclarados conforme as normas ABNT NBR ISO 14040 (2014) e ABNT NBR ISO 14044 (2014), tais como o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) (Belizario-Silva *et al.*, 2022); as Declarações Ambientais de Produtos (DAP) publicadas por empresas que atuam no setor nacional de produção de cimento *Portland* e aço (INTERNATIONAL EPD®, 2023), e o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros (SICV Brasil) (IBICT, 2023). Também foram identificadas outras fontes de dados ambientais nacionais que podem ser empregadas

nos estudos de ACV de rodovias, como os parâmetros de desempenho de equipamentos do SICRO (DNIT, 2023) e os relatórios de emissões veiculares divulgados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022).

Figura 2.6 - Exemplo de países com fontes de dados ambientais públicas para estudos de ACV de rodovias ¹



Nota ¹ A listagem de fontes de dados ambientais abrange predominantemente as fases de extração de matéria-prima da natureza e a produção de materiais como o cimento *Portland*, concreto, insumos asfálticos, aço, materiais pétreos e combustíveis fósseis.

Fonte: Autor.

A Figura 2.6 mostra ainda a diferença entre a quantidade de fontes de dados ambientais disponíveis em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Segundo Vigon *et al.* (2017), países como o Brasil, a Malásia e a Tailândia apresentam significativos progressos na ACV, mas ainda possuem inventários de produtos com muitas falhas, como a documentação incompleta e a ausência de revisão e validação dos inventários por fontes independentes. Esses fatores, aliados à falta de uma legislação que incentive o desenvolvimento e o uso dessas bases ambientais pela sociedade, são interpretados como problemas que devem ser solucionados pelas entidades públicas dos referidos países.

As dificuldades observadas no estudo citado anteriormente permanecem atuais para o Brasil. O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) possui atualmente 34 inventários com dados atualizados relativos à produção de energia elétrica, diesel, gás natural e transporte rodoviário de cargas, divulgados pelo Instituto Brasileiro de Informação

em Ciência e Tecnologia (IBICT) em maio de 2023 (IBICT, 2023). A disponibilização pública desses dados representa um importante avanço para os estudos de ACV conduzidos no Brasil, mas ainda parece ser insuficiente para o desenvolvimento de um estudo que contemple todos os insumos contidos num projeto executivo de engenharia rodoviária, cuja quantidade pode superar 150 itens (DNIT, 2022a).

Além disso, foi instituído por meio da Resolução Conmetro n° 22/2016 o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), que dentre outras atribuições deve regulamentar a forma de elaboração e validação de Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) da economia brasileira, também conhecidas como Rotulagem Ambiental Tipo III (ISO 14025, 2006). Contudo, ao consultar o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) através da Plataforma Integrada de Ouvidoria e Acesso à Informação do Governo Federal (INMETRO, 2023), constatou-se que ainda não há Regras de Categorias de Produtos (RCPs) editadas pelo poder público brasileiro. As RCPs detalham os procedimentos para a elaboração de DAPs de produtos específicos, como cimentos e aços, seguindo padrões metodológicos que posteriormente permitem uma adequada comparação dos impactos ambientais entre produtos pertencentes a um mesmo grupo. Ainda segundo o INMETRO, a primeira tentativa nacional de desenvolvimento de RCP foi frustrada pelo desinteresse do setor privado em contribuir com a sua elaboração. As atuais DAPs de produtos nacionais (INTERNATIONAL EPD®, 2023) foram editadas seguindo as especificações de RCPs internacionais. A relevância das DAPs no tema em questão é demonstrada por publicações que citam a possibilidade do seu emprego em estudos de ACV de rodovias (Harvey; Butt; Org, 2023; Rangelov *et al.*, 2021; Toller, 2018; Ashtiani *et al.*, 2024).

A falta de dados ambientais de produtos da economia brasileira leva ao uso parcial ou completo de dados de outros países nas pesquisas nacionais de ACV de rodovias, conforme consta na Tabela 2.3. As pesquisas nacionais concentram-se na utilização de dados de produção de insumos como cimento, aço e betume da Europa e dos EUA, enquanto as principais fontes de dados ambientais do Brasil são a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (matriz energética) e o SICRO (parâmetros operacionais dos equipamentos). Porém, em algumas pesquisas nacionais é difícil determinar se os dados advindos da base de dados *Ecoinvent*, por exemplo, são específicos do Brasil, relativos a outros países ou genéricos.

Tabela 2.3 - Estudos de ACV de rodovias no Brasil com as fases e algumas das bases de dados ambientais consideradas

Autor	Fase ACV				Bases de dados ambientais		
	Prod.	Const.	Uso	Fim vida	Brasil	EUA	Europa
(Osorto; Casagrande, 2023)	✓	✓			EPE SICRO	U.S. EPA	
(Luvizão; Trichês, 2023)	✓		✓		SICRO		Ecoinvent
(Rocha et al., 2022)	✓	✓					Ecoinvent
(Mascarenhas et al., 2022)	✓				EPE		Ecoinvent Eurobitume
(Donato et al., 2022)	✓	✓					Ecoinvent
(Grael et al., 2021)	✓	✓			EPE		Ecoinvent
(Pilger et al., 2020)	✓	✓			EPE		Ecoinvent
(Nascimento et al., 2020)	✓	✓					Ecoinvent
(Rosado et al., 2017)	✓	✓			EPE	USLCI	Ecoinvent
(Savietto, 2017)	✓		✓	✓	SICRO	USLCI	

Abreviações: EPE – Empresa de Pesquisa Energética; U.S EPA - *U.S. Environmental Protection Agency*; US LCI - *U.S. Life Cycle Inventory Database*.

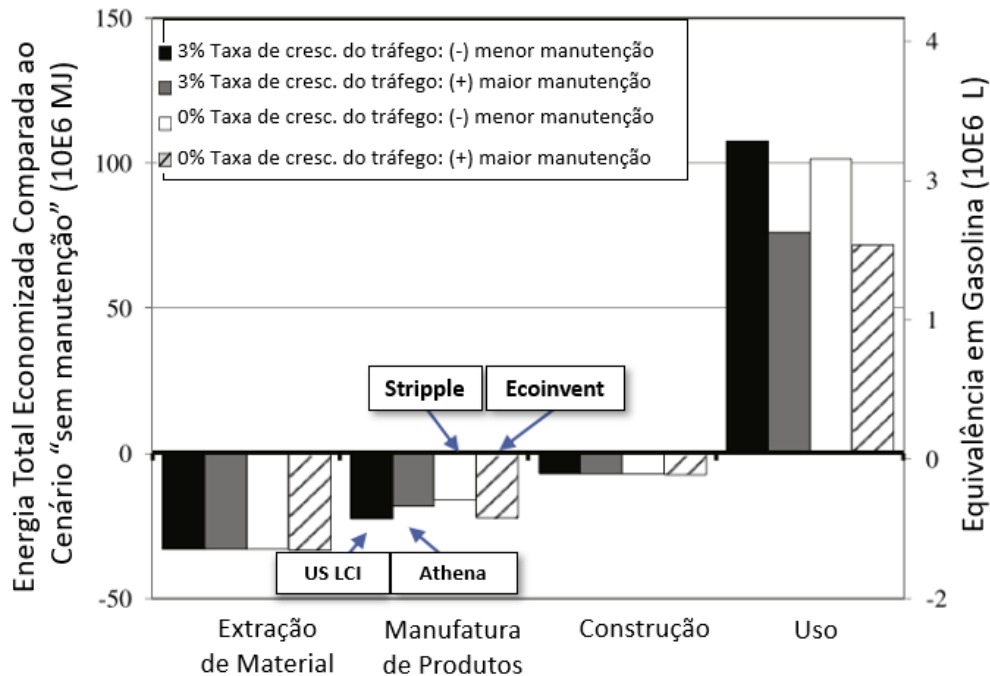
Fonte: Autor.

As recentes pesquisas nacionais sobre ACV em rodovias concentram-se principalmente na comparação entre soluções de pavimentação rígida e flexível, considerando a inclusão ou não de materiais alternativos, como asfalto e brita reciclados, nas diversas camadas de pavimentação. Além disso, a Tabela 2.3 evidencia que tais estudos dão ênfase à avaliação dos impactos ambientais nas etapas que englobam a extração de matérias-primas da natureza, o transporte, a produção e a construção. Observou-se também que a incorporação de dados estrangeiros nessas pesquisas não vem sendo acompanhada pela devida avaliação das incertezas associadas a essa condição de contorno.

Ao analisar os artigos, constatou-se também que as pesquisas que utilizam informações disponíveis em bases de dados comerciais ou públicas apresentam uma menor ponderação em relação à realização de análise prévia para avaliar a sua adesão ou adequação à situação específica em estudo. A ausência de análise prévia dos dados utilizados nos estudos de ACV é relevante e pode comprometer os seus resultados (Lloyd; Ries, 2007). A pesquisa desenvolvida por Wang *et al.* (2012) exemplifica variações nos resultados de um estudo de

ACV de pavimento em função do emprego de quatro diferentes bases de dados, conforme ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Consumo de energia em distintas fases do ciclo de vida de um pavimento com o emprego de distintas bases de dados



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2012).

A Figura 2.7 demonstra que as principais diferenças decorrentes do uso de distintas bases de dados nos estudos de ACV de rodovias residem principalmente nas fases de produção de materiais e utilização das rodovias. É evidenciado ainda que os resultados também são influenciados pela intensidade das intervenções de manutenção e pelo volume de tráfego, com os maiores reflexos percebidos na fase de uso da rodovia. Nesse mesmo sentido, a pesquisa desenvolvida por Santero, Masanet e Horvath (2011a) apresenta valores de intensidade de energia consumida na produção de 1 kg de cimento que variam entre 4,8 e 7,3 MJ, mas desta vez em referência a dados divulgados por outros pesquisadores. Isso demonstra a importância da análise crítica dos dados para adotar aqueles que sejam os mais representativos para o local do estudo.

Outro elemento importante da etapa de ICV é a definição e quantificação das saídas vinculadas aos fluxos estabelecidos nos estudos. A literatura demonstra que os estudos de ACV de rodovias priorizam saídas de dados em termos de emissão de CO₂ eq. e energia primária consumida ao longo das distintas fases do seu ciclo de vida. Contudo, em que pese a existência de uma certa uniformização sobre os dados de saída, os estudos de ACV de

rodovias empregam processos com distintos dados ou variáveis de entrada, como tipo de veículos, volume de tráfego, solução de pavimentação (Santos; Ferreira; Flintsch, 2015b; Wang *et al.*, 2012) e as condições funcionais e estruturais do pavimento (XU *et al.*, 2019).

2.2.4 Avaliação de impacto do ciclo de vida e interpretação dos resultados

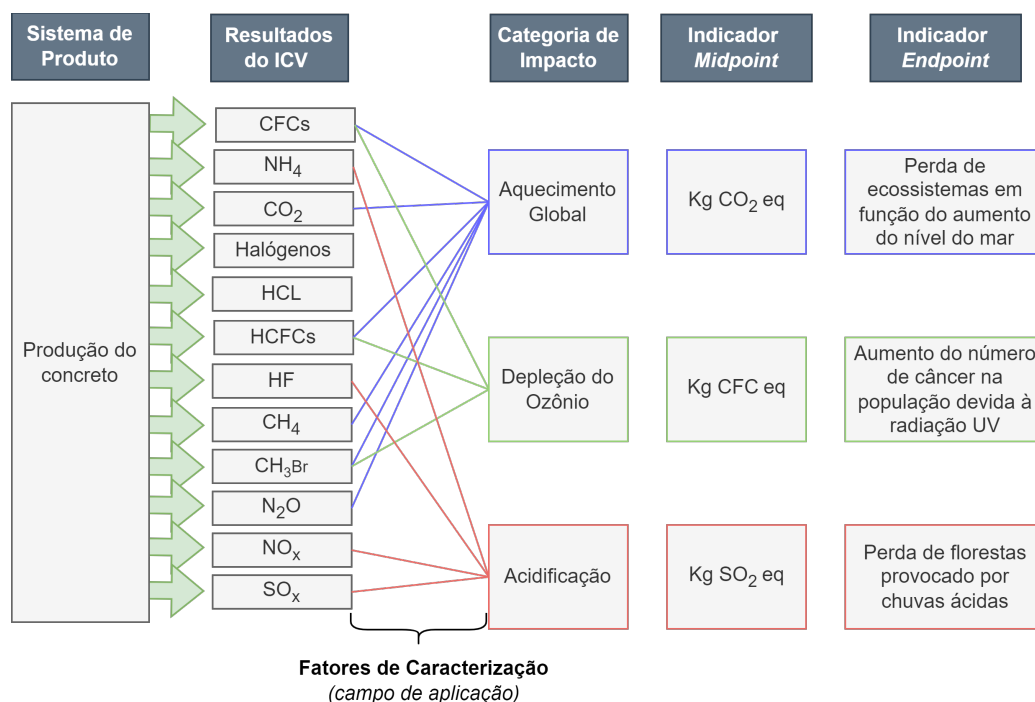
A avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e a interpretação dos resultados representam a terceira e quarta fases do estudo de ACV, respectivamente (Figura 2.4).

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2014), a AICV visa estudar a significância dos impactos ambientais potenciais utilizando os resultados do ICV e é constituída pelos seguintes elementos obrigatórios:

- a) **Seleção das categorias de impacto e classificação:** nesta etapa são definidos os impactos ambientais relevantes para o estudo. Os fluxos elementares do inventário do ciclo de vida — a exemplo do consumo de recursos e as emissões para a atmosfera — são então atribuídos às categorias de impacto e aos seus indicadores segundo a capacidade da substância de contribuir para diferentes problemas ambientais.
- b) **Caracterização:** o impacto de cada emissão ou consumo de recursos é modelado quantitativamente, e o resultado é expresso como uma pontuação de impacto em uma unidade de medida comum dentro da mesma categoria de impacto. Por exemplo, cada GEE tem uma capacidade específica de reter calor em determinada intensidade. Essa capacidade é então comparada à do CO₂, e o resultado é expresso em termos de CO₂ eq. Essa relação pode ser interpretada como o potencial de aquecimento global de cada gás (EC-JRC, 2010). Conforme o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2013), para um horizonte de impacto de 100 anos, 1 kg de metano (CH₄) emitido na atmosfera equivale a 28 kg de CO₂, enquanto 1 kg de óxido nitroso (N₂O) é equivalente a 265 kg de CO₂. Os valores de 28 e 265 são os fatores de caracterização desses gases na categoria de impacto de “Mudança Climática” do atual modelo de caracterização do IPCC.

A Figura 2.8 apresenta a aplicação dos principais conceitos dos elementos obrigatórios da AICV, enquanto a Tabela 2.4 traz uma descrição desses elementos, os quais também fornecem suporte para a fundamentação das próximas etapas desta pesquisa.

Figura 2.8 - Etapas da AICV com exemplos de categorias de impacto e indicadores de ponto médio (*midpoint*) e final (*endpoint*)



Fonte: Baseado em EC-JRC (2010).

Tabela 2.4 – Principais termos usados na AICV

Termo	Descrição	Exemplo
Categoria de impacto	Categoria de impacto ambiental de interesse.	Mudança climática.
Resultados do ICV	Fluxo específico do inventário, por exemplo as emissões.	Quantidade de gás de efeito estufa por unidade funcional.
Modelo de caracterização	Relação entre os resultados do ICV e a categoria de impacto de interesse.	Modelo de linha de base para 100 anos do IPCC.
Indicador de categoria	Unidade utilizada para mensurar o impacto ambiental.	CO ₂ eq, definido pelo forçamento radiativo infravermelho (W/m ²) de um GEE ao longo de um horizonte de tempo específico. É um indicador de ponto médio (<i>midpoint</i>).
Fator de caracterização	Valor derivado do modelo de caracterização para converter o resultado de ICV na unidade comum do indicador de categoria.	Potencial de aquecimento global para cada gás de efeito estufa (kg CO ₂ eq./kg gás).
Resultado do indicador de categoria	Resultado agregado advindo da combinação de todos os resultados do ICV e respectivos fatores de caracterização.	kg de CO ₂ eq. por unidade funcional.
Pontos finais de categoria	Potenciais danos advindos da categoria de impacto selecionada.	Perdas de espécies, florestas, plantações, efeitos na saúde humana. São indicadores de ponto final (<i>endpoint</i>).

Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 14044 (2014).

A versão do ILCD Handbook intitulada *Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context* (EC-JRC, 2010) detalha os principais métodos de análise de AICV: CML 2002, Eco-Indicator 99, EDIP 1997, EDIP 2003, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Ecological Scarcity Method, TRACI, MEEuP e USEtox. Esses métodos reúnem algumas diferenças entre si, a exemplo de indicadores ambientais, categorias de indicadores (*midpoint* ou *endpoint*), e regras de ponderação e normalização dos resultados. Esses dois últimos procedimentos, inclusive, constam na ABNT NBR ISO 14044 (2014) como elementos opcionais de uma AICV.

A literatura selecionada demonstrou que as categorias de impacto ambiental mais empregadas nos estudos de ACV de rodovias estão vinculadas à Mudança Climática. Contudo, a literatura aponta que não há um padrão referencial capaz de disciplinar o tipo de indicador ambiental e o método de impacto ambiental ideais para os estudos de ACV de rodovias (Mattinzioli *et al.*, 2021). Além disso, foi identificada uma única referência metodológica que traz indicadores de sustentabilidade específicos para as diversas fases do ciclo de vida de empreendimentos rodoviários (CEN, 2016), mas com uma abordagem que engloba indicadores de impacto social e econômico aos resultados, sendo que esses dois não são considerados pela ABNT NBR ISO 14040 (2014).

Ainda em relação aos métodos de avaliação de impacto ambiental, as pesquisas selecionadas demonstraram que a metodologia *Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts* (TRACI) foi a mais utilizada nos estudos de ACV de rodovias. No entanto, notou-se que, independentemente do método utilizado para a avaliação dos impactos ambientais, a quantificação dos resultados relacionados à categoria de impacto Mudança Climática seguiu o modelo delineado nos Relatórios de Avaliação do IPCC, com destaque para os fatores de caracterização da sua quinta edição (IPCC, 2013).

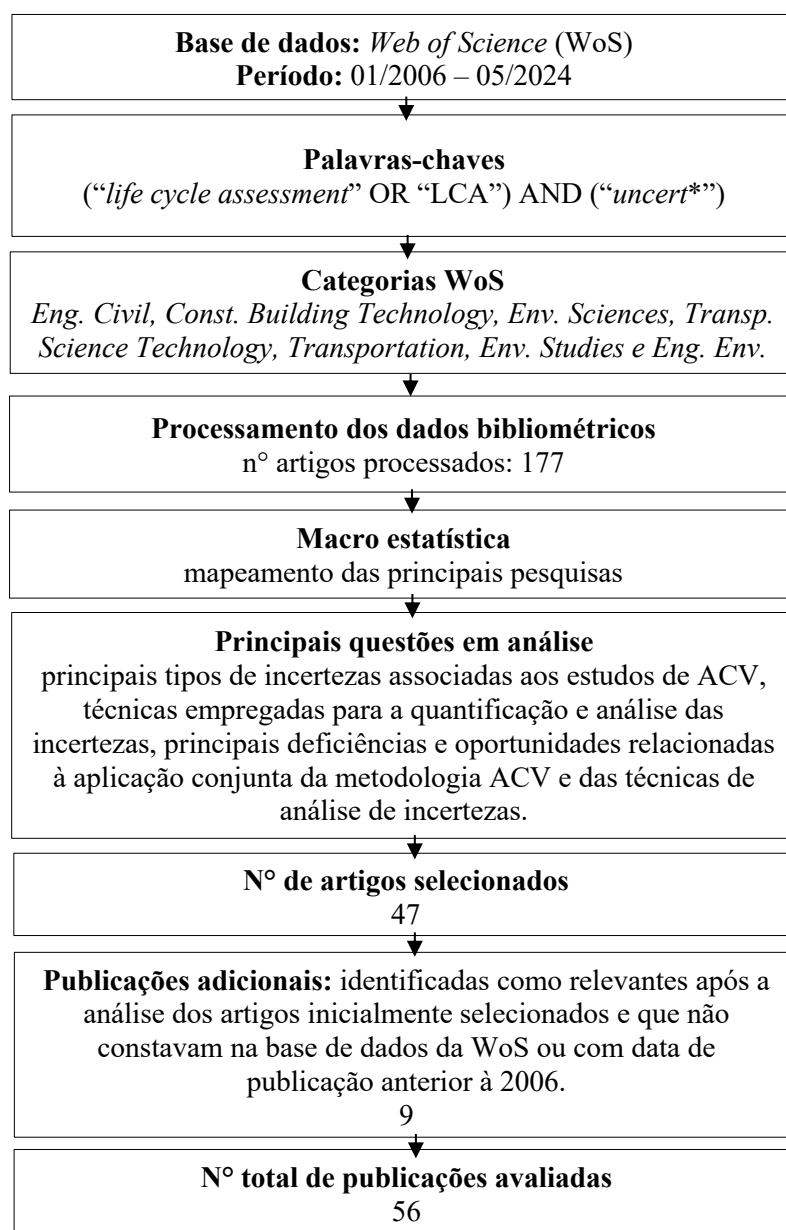
A etapa de interpretação, por sua vez, é conceituada pela ABNT NBR ISO 14040 (2014) como a responsável pela avaliação conjunta das constatações realizadas nas fases de análise de inventário e de avaliação de impacto, sendo esclarecido ainda que nessa fase devem ser fornecidos resultados consistentes com o objetivo e escopo previamente definidos no estudo, além das conclusões, limitações e eventuais recomendações. Para a realidade das publicações consultadas, em função das particularidades inerentes a cada estudo desenvolvido, com objetivos, escopos e condições de contorno próprias, não foi possível constatar um padrão em relação à forma de interpretação dos resultados, tampouco uma

correlação entre os resultados obtidos pelos diversos pesquisadores para compará-los entre si.

2.3 INCERTEZAS NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Esta seção aborda a revisão da literatura sobre a quantificação e análise de incertezas nos estudos de avaliação do ciclo de vida, que representa o segundo eixo temático desta pesquisa. A Figura 2.9 detalha o fluxograma utilizado para a revisão bibliográfica desse segundo eixo.

Figura 2.9 - Evolução do número de publicações anuais relacionadas às incertezas na ACV (período de referência: 01/2006 a 05/2024)



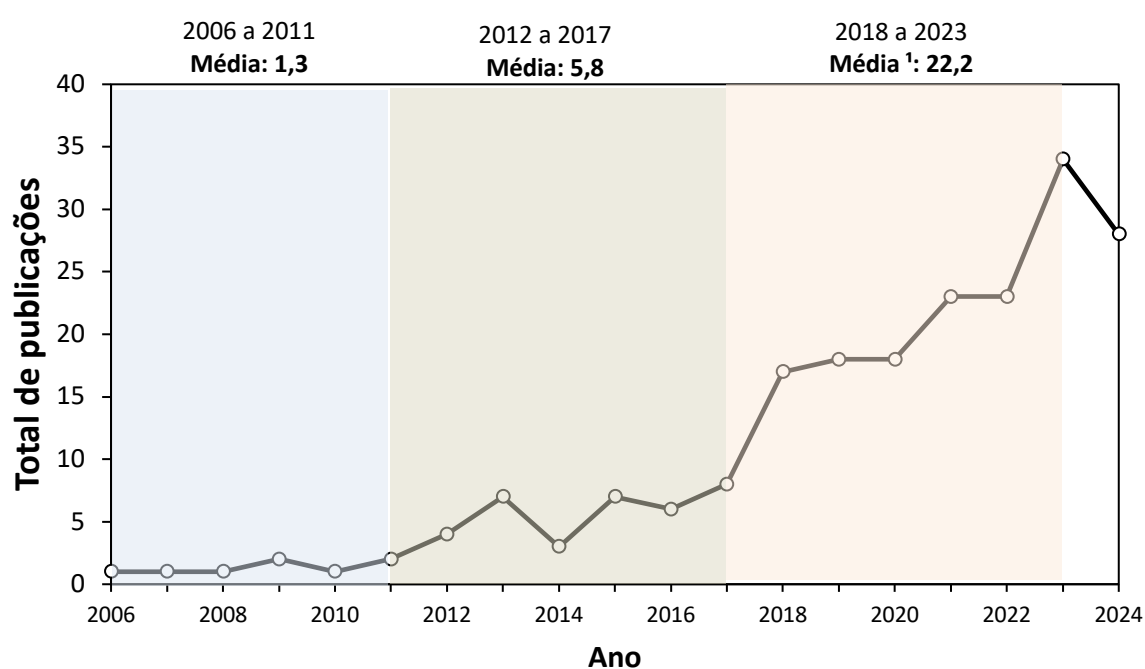
Fonte: Autor.

A delimitação temporal desse segundo eixo temático compreendeu o período de janeiro de 2006 a maio de 2024, com a escolha de categorias e áreas de estudo alinhadas aos objetivos desta pesquisa. Após a seleção inicial de 177 artigos, os dados foram processados para obter uma visão geral do comportamento das linhas de pesquisa ao longo do período estabelecido, possibilitando a identificação dos principais autores, instituições e artigos na área. Em seguida, orientado pelas principais questões de análise detalhadas na Figura 2.9, 47 artigos foram separados e analisados na sua totalidade. Adicionalmente, foram escolhidas outras 9 publicações consideradas relevantes para a pesquisa, mesmo que não estivessem presentes na base de dados da WoS ou fossem anteriores ao ano de 2006. Dessa forma, um total de 56 publicações foram selecionadas e avaliadas nesse segundo eixo temático.

2.3.1 Histórico de publicações e conceitos básicos

A análise dos dados bibliométricos revela que as principais publicações sobre as incertezas na ACV estão vinculadas à China (30%) e aos EUA (28%), seguidos por países como o Reino Unido, Canadá, Espanha, Itália e Austrália. Essas publicações estão concentradas em três principais periódicos: *Building and Environment*, *Journal of Building Engineering* e *Energy and Buildings*. A evolução do número de publicações científicas relacionadas às incertezas na ACV está representada na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Evolução do número de publicações anuais relacionadas às incertezas na ACV (período de referência: 01/2006 a 05/2024)



Nota ¹ Os dados relativos a 2024 não foram contabilizados por representarem uma fração do ano.
Fonte: *Web of Science*.

O comportamento das publicações anuais desse segundo eixo temático pode ser dividido em três períodos. O primeiro período, que abrange os anos de 2006 a 2011, revela um volume relativamente baixo de publicações, um comportamento possivelmente influenciado pela fase de consolidação das orientações gerais fornecidas pela série de normas da ISO 14040 (Guinée *et al.*, 2011). Os dois períodos seguintes são caracterizados pelo aumento do número de publicações anuais sobre o tema, com um volume mais expressivo no último período (2018-2023), cuja média foi de 22,2. Além disso, embora as médias de publicação entre o primeiro (Figura 2.2) e esse segundo eixo temático sejam diferentes, observa-se uma tendência de crescimento das publicações entre os períodos subsequentes, destacando o ganho de relevância desses dois temas nas atuais pesquisas de ACV.

Quanto aos conceitos básicos, o *Guidelines* para os inventários nacionais de gases de efeito estufa do IPCC, em seu volume relativo às incertezas (IPCC, 2006a), define a incerteza como a falta de conhecimento do valor verdadeiro de uma variável e pode ser definida como uma função de densidade de probabilidade, que caracteriza a faixa e a probabilidade de valores possíveis. Além disso, esclarece que a incerteza está relacionada ao nível de conhecimento do analista, que por sua vez depende da qualidade e quantidade dos dados disponíveis, bem como do conhecimento dos processos e métodos de inferência.

A ABNT NBR ISO 14040 (2014) define a análise de incerteza em estudos de ACV como um procedimento sistemático para quantificar a incerteza introduzida nos resultados de uma análise de inventário do ciclo de vida em função de efeitos cumulativos de imprecisão dos modelos, incerteza das entradas e variabilidade dos dados. A norma também ressalta que a quantificação da incerteza pode ser determinada através da distribuição de probabilidade ou de faixas de probabilidade dos resultados, mas sem fornecer mais detalhes sobre como aplicar as técnicas de quantificação de incertezas nos estudos de ACV.

Apesar de também não fornecer um procedimento de cálculo para quantificar as incertezas em estudos de ACV, a ABNT NBR ISO 14044 (2014) recomenda que os resultados sejam acompanhados pela análise de sensibilidade e quantificação das incertezas em casos de estudos comparativos. Essa mesma recomendação consta no ILCD Handbook (EC-JRC, 2010).

Embora não tenham sido identificadas normas com uma metodologia para quantificar as incertezas nos estudos de ACV, é possível notar na literatura pesquisas que se dedicam a esse tema, as quais podem ser categorizadas em dois grupos. O primeiro procura estabelecer

conceitos e procedimentos para a caracterização, quantificação e análise das incertezas na ACV, sem necessariamente envolver um campo específico de aplicação, mas focando na avaliação das incertezas dos dados de inventário (Canter *et al.*, 2002; Kennedy; Montgomery; Quay, 1996; Weidema B P *et al.*, 2013). O segundo grupo está ligado ao emprego dos princípios divulgados pelo primeiro grupo em estudos de caso de ACV. A Tabela 2.5 apresenta exemplos de estudos de ACV nas áreas rodoviária e construção civil com o emprego de técnicas de análise de incertezas, assim como a associação existente entre os mencionados grupos.

Tabela 2.5 - Exemplos de publicações: definição de conceitos de incertezas na ACV (Grupo 1) e sua aplicação nos estudos (Grupo 2)

Setor	Grupo 1 Definição de conceitos	Grupo 2 Emprego de conceitos
Rodovias	(Weidema, 1998; Weidema B P <i>et al.</i> , 2013)	(Abed <i>et al.</i> , 2023)
	(Canter <i>et al.</i> , 2002; Lloyd; Ries, 2007; Mark A.J. Huijbregts <i>et al.</i> , 2001; Pedersen Weidema; Suhr Wesnaes, 1996; Weidema, 1998)	(Yoo; Ozer; Ham, 2019)
Construção Civil	(Canter <i>et al.</i> , 2002; Huijbregts; Wim Gilijamse; Lucas Reijnders, 2003; Kennedy; Montgomery; Quay, 1996; Maurice <i>et al.</i> , 2000; May; Brennan, 2003; Pedersen Weidema; Suhr Wesnaes, 1996; Weidema, 1998)	(Hong <i>et al.</i> , 2016)
	(Huijbregts, 1998; Lloyd; Ries, 2007; Mark A.J. Huijbregts <i>et al.</i> , 2001; Pedersen Weidema; Suhr Wesnaes, 1996; Weidema B P <i>et al.</i> , 2013)	(Baiochi; Silva, 2021)

Fonte: Autor.

A Tabela 2.5 demonstra que, independentemente do setor no qual o estudo ACV está sendo aplicado, seja rodoviário ou construção civil, as referências conceituais utilizadas para quantificar e analisar as incertezas são praticamente as mesmas, embora algumas delas ultrapassem 20 anos de publicação. Esse comportamento foi observado na maioria dos artigos inicialmente analisados, em que pelo menos um dos autores do “Grupo 1” foi utilizado para fundamentar ou detalhar a metodologia de avaliação das incertezas dos estudos. Nesse sentido, destacam-se as publicações de Weidema e Wesnaes (1996); Weidema (1998) e Weidema B P *et al.* (2013) como as principais referências associadas à definição de conceitos e técnicas de análise de incertezas nos estudos de ACV.

2.3.2 Tipos de incertezas e técnicas de análise

Segundo Oliveira *et al.* (2021), as incertezas são inerentes aos estudos de ACV e negligenciá-las na análise do resultado pode levar a conclusões tendenciosas ou até mesmo incorretas. Os autores destacam ainda que a identificação e quantificação das incertezas torna-se ainda mais importante em avaliações que incluem sistemas de alta complexidade e longos ciclos de vida.

De acordo com Lloyd e Ries (2007), as incertezas em estudos de ACV podem ser divididas em três tipos: parâmetro, cenário e modelo. Essa divisão representa atividades de um processo de modelagem típico, tais como a definição dos dados de entrada (parâmetros), a seleção dos cenários de análise e a construção do modelo matemático. As definições associadas a essas três categorias estão detalhadas a seguir.

Incerteza de Modelo

Os modelos são uma simplificação de sistemas reais. As incertezas de modelo envolvem os modelos matemáticos e os fatores de caracterização usados na fase de avaliação de impacto de ciclo de vida na tentativa de expressar a realidade (IPCC, 2006a).

Incerteza de Cenário

As incertezas de cenário se referem às escolhas relativas à construção dos cenários, como a unidade funcional, procedimentos de alocação, peso dos fatores de emissão e horizontes de tempo (Huijbregts, 1998).

Incerteza de Parâmetro

As incertezas de parâmetro estão relacionadas aos dados de inventário e podem ser caracterizadas da seguinte forma (Huijbregts, 1998; Lloyd; Ries, 2007; Weidema; Wesnaes, 1996; Weidema, 1998; Weidema B P *et al.*, 2013):

- a) **imprecisão de dados:** associada a erros produzidos nas atividades de aferição, registro, transmissão de dados, realização de aproximações, entre outros;
- b) **falta de dados:** pode haver incertezas nos casos em que se tenta realizar as medições, mas não há dados disponíveis;
- c) **lacunas de dados:** ausência de dados representativos que seriam necessários para caracterizar uma emissão em particular. Nessa situação, pode-se fazer o uso de dados

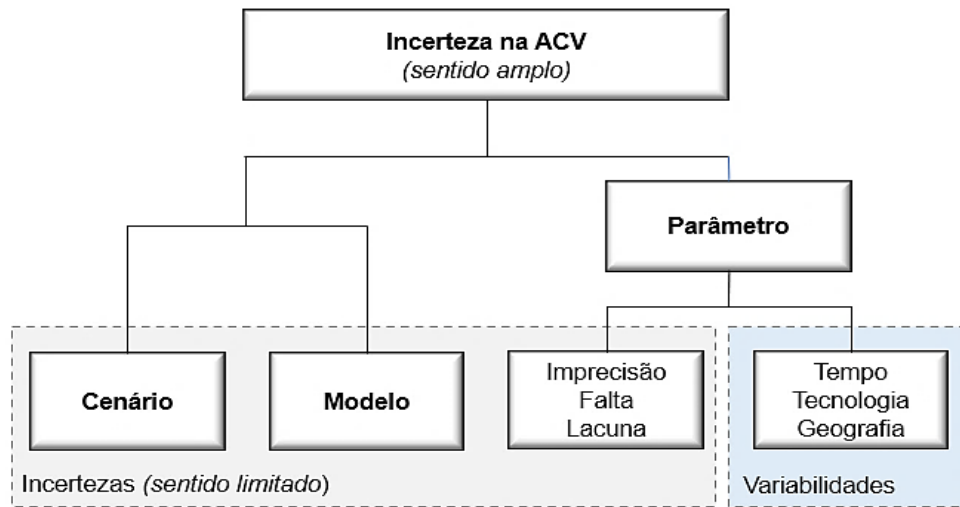
substitutos ou similares, ou recorrer à extrapolação para estimar os valores das emissões;

- d) **dados não representativos:** falta de correspondência entre as condições vinculadas aos dados disponíveis e as condições reais;
- e) **variabilidade temporal:** aferições realizadas em períodos anteriores podem não mais representar as atuais condições de operação de um determinado sistema, resultando em incertezas se aplicados em sistemas que possuem condições de operação atual distintas;
- f) **variabilidade espacial:** dados de outras regiões podem não representar as condições do local em estudo, resultando em incertezas nos resultados, e
- g) **variabilidade tecnológica:** os dados de inventário e as emissões estão diretamente ligados ao desempenho operacional de seu sistema, o qual é fortemente influenciado pela tecnologia. Portanto, a utilização de dados de produtos equivalentes, porém fabricados com tecnologias diferentes, trazem incertezas aos resultados.

As definições apresentadas anteriormente indicam que o termo “incerteza na ACV” pode ser empregado de maneira ampla para abranger todas as incertezas e variabilidades relacionadas a um estudo de avaliação do ciclo de vida, conforme proposto por Lloyd e Ries (2007) e pela definição estabelecida na ABNT NBR ISO 14040 (2014). Nesse contexto, a Figura 2.11 apresenta, de maneira simplificada, os três tipos de incerteza associados aos estudos de ACV (modelo, cenário e parâmetro) e como eles podem ser organizados dentro do conceito amplo de incerteza desses estudos.

A Figura 2.11 evidencia que os termos “incertezas (sentido limitado)” e “variabilidades” não são sinônimos, embora o “Parâmetro” compartilhe elementos de ambos. Por exemplo, a imprecisão, a falta e a lacuna de dados fazem parte do grupo de incertezas (sentido limitado), enquanto as variações temporal, geográfica e tecnológica estão incluídas no grupo de variabilidades dos parâmetros. A reunião dos elementos desses dois grupos forma a incerteza total dos parâmetros utilizados nos estudos de ACV.

Figura 2.11 - Representação simplificada dos tipos de incerteza em estudos de ACV



Fonte: Baseado em Lloyd e Ries (2007) e ABNT NBR ISO 14040 (2014).

Segundo Begg, Welsh e Bratvold (2014), é comum o uso incorreto dos termos “incerteza (sentido limitado)” e “variabilidades” nas pesquisas. Isso pode gerar confusão sobre o que está sendo quantificado e declarado como incerteza nos estudos de ACV. Inclusive, essa situação foi constatada em uma das publicações analisadas (Liu; Wang; Li, 2017). Por esse motivo, os conceitos associados a esses termos são apresentados a seguir, conforme definido por IPCC (2006a):

- a) **incerteza:** falta de conhecimento do valor verdadeiro de uma variável, mas que pode ser estimada usando uma função densidade de probabilidade. A função de probabilidade pode ser caracterizada com base nas informações ou evidências disponíveis sobre qual pode ser o valor verdadeiro. A incerteza depende do nível de conhecimento do analista, e
- b) **variabilidade:** heterogeneidade de uma variável através do tempo, do espaço, dos membros de uma população ou de algum outro índice. A variabilidade é quantificada usando estatísticas derivadas de medições ou observações, ou seja, dados. A variabilidade é uma propriedade inerente ao sistema ou à natureza, e não ao analista.

Ainda de acordo com IPCC (2006a), a principal diferença entre a incerteza e a variabilidade é que a primeira pode ser reduzida com o acréscimo de informações, enquanto a segunda não.

Constatou-se também que a denominação dos tipos de incerteza na ACV pode assumir pequenas variações entre os autores. Por exemplo, Weidema (1998) e Weidema B P *et al.* (2013) consideram dois tipos de incerteza: a incerteza básica, inerente aos dados e resultante de erros de medida, lacunas e ausência de dados; e a incerteza adicional, relacionada à qualidade dos dados que não atendem a um padrão mínimo, avaliada através de cinco indicadores: confiabilidade, completude, e correlações temporal, geográfica e tecnológica. Huijbregts (1998), por outro lado, cita como incertezas de parâmetro apenas a imprecisão, a falta, a lacuna e a ausência de representatividade dos dados, agrupando as variabilidades temporal, espacial e tecnológica em uma categoria própria, mas que também interferem na incerteza total dos resultados de ACV. Apesar das diferenças mencionadas, a influência combinada das incertezas e das variabilidades nos resultados de um estudo de ACV é igualmente reconhecida pelos autores, seguindo a estrutura de organização apresentada na Figura 2.11.

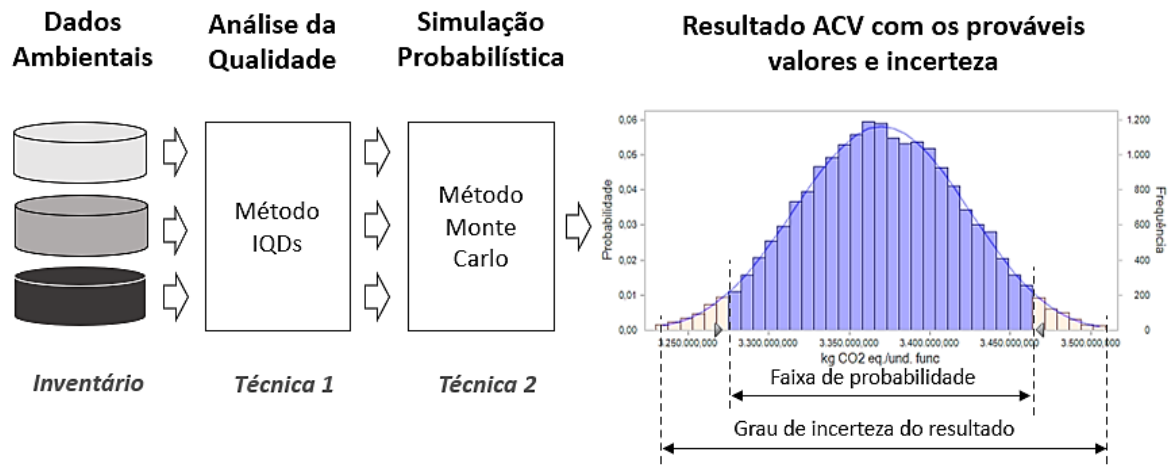
Contudo, é possível notar que algumas das recentes publicações que tratam da quantificação de incertezas em estudos de ACV de rodovias não apresentam definições claras quanto aos tipos (seja modelo, cenário ou parâmetro) que estão sendo considerados nas pesquisas, conforme consta na Tabela 2.7. Segundo Gregory *et al.* (2016), as incertezas de cenário e parâmetro são frequentemente analisadas em conjunto, quando na realidade deveriam ser analisadas separadamente. Os estudos realizados por Azarijafari, Yahia e Amor (2018) e Ziyadi e Al-qadi (2019) são casos pontuais de estudos de ACV de rodovias em que os diferentes tipos de incerteza foram definidos e avaliados individualmente.

A literatura demonstra ainda que as pesquisas sobre ACV de rodovias têm se concentrado principalmente na avaliação das incertezas de parâmetro com o uso das técnicas de análise de sensibilidade, indicadores de qualidade dos dados e simulação probabilística (Abed *et al.*, 2023; Bressi; Primavera; Santos, 2022; Cao *et al.*, 2019; Mattinzioli *et al.*, 2021; Umer *et al.*, 2017; Yoo; Ozer; Ham, 2019). De acordo com Ziyadi e Al-Qadi (2019), a complexa tarefa da mensuração das incertezas relacionadas ao modelo e ao cenário dificulta o estabelecimento de metodologias sistemáticas para a sua quantificação, possivelmente contribuindo para a escassez de pesquisas na área rodoviária que abordam tais tipos de incertezas. De toda forma, essa lacuna de conhecimento pode ser uma motivação para novas frentes de pesquisa no tema ACV de rodovias.

No contexto brasileiro, não foi identificada a aplicação conjunta da metodologia ACV e técnicas de análise de incerteza em estudos relacionados a rodovias. Foram identificados apenas três estudos nacionais com esse enfoque, mas voltados para o setor da construção civil (Baiochi; Silva, 2021; Bueno *et al.*, 2016; Morales *et al.*, 2020;)

A Tabela 2.6 apresenta a relação entre as fases de ACV, os principais tipos de incerteza e as técnicas utilizadas para a sua avaliação ou redução, enquanto a Tabela 2.7 características de alguns dos estudos de ACV de rodovias analisados nos quais houve a quantificação e análise de incertezas. Como já mencionado, a análise das publicações consultadas releva que as principais técnicas utilizadas nesses estudos são a simulação probabilística por meio do Método Monte Carlo (MMC), Método indicadores de qualidade dos dados (Método IQDs), cuja base metodológica foi inicialmente proposta por Weidema e Wesnaes (1996), e análise de sensibilidade. Em regra, as duas primeiras técnicas são aplicadas de forma conjunta, seguindo o fluxograma da Figura 2.12.

Figura 2.12 – Representação simplificada da relação entre as técnicas Método IQDs e MMC nos estudos de ACV



Fonte: Autor

O fluxograma apresentado na Figura 2.12 demonstra que após a análise de qualidade dos dados de inventário por meio do Método IQDs, as suas saídas são utilizadas como variáveis de entrada para a simulação probabilística realizada pelo MMC, criando assim uma relação de dependência entre as duas técnicas para a obtenção do resultado de ACV e de sua correspondente incerteza. Dessa forma, e tendo em vista que essas duas técnicas são usadas no Modelo de ACV desta pesquisa, elas são apresentadas em detalhes nas próximas seções.

Tabela 2.6 - Relação entre fases ACV, tipos de incerteza e técnicas para a sua avaliação ou redução

Tipos de incerteza	Fases ACV		
	Objetivo e escopo	Análise de inventário	Avaliação de impacto
Imprecisão dos dados		✓ P, MQD, IQD, MA, AS, AHP, ED, EB, SMP	✓ P, MQD, IQD, MA, AS, AHP, ED, EB, SMP
Falta de dados		✓ RBD, EP, MA, RC	✓ RBD, EP, MA, RC
Lacuna de dados		✓ RBD, EP, MA, RC	
Dados não representativos		✓ RBD, MQD, IQD, MA, RC, AS, AHP, MC	
Variação temporal		✓ MD, AS, AHP, ED, EB, MC	✓ MD, AS, AHP, ED, EB, MC
Variação espacial		✓ MD, AS, AHP, ED, EB, MC	✓ MD, AS, AHP, ED, EB, MC
Variação tecnológica		✓ MA, AS, AHP, ED, EB, MC	✓ MA, AS, AHP, ED, EB, MC
Cenário	✓ RC, AS, AHP	✓ RC, AS, AHP	✓ RC, AS, AHP
Modelo		✓ MD, AS, AHP, MC	✓ MD, AS, AHP, MC
Técnicas para reduzir ou avaliar a incerteza na ACV			
RC – Revisão crítica	Permite assegurar que os métodos, dados e interpretações utilizados são apropriados e refletem os objetivos do estudo.		
P – Padronização	Adotar conjuntos de procedimentos pré-definidos tem o potencial de aumentar a confiabilidade dos estudos e reduzir erros.		
AHP – Análise hierárquica	Oferece a possibilidade de atribuir pesos diferentes aos dados, refletindo a importância relativa dos dados em função do maior ou menor potencial de seu impacto ambiental, ou das diferentes incertezas associadas a eles.		
SMP – Simulação probabilística	Utilizada para estimar a faixa e a probabilidade dos valores possíveis de um estudo com base na propagação das incertezas dos dados de entrada no resultado.		
RBD – Revisão das bases de dados	Permite identificar possíveis fatores que podem prejudicar a qualidade do estudo, como erros de medição, ou a identificação de outras bases de dados com melhor qualidade ou que sejam mais adequadas à situação em estudo.		
MQD – Metas de qualidade dos dados	Elenca as características qualitativas desejáveis para os dados de entrada do estudo ACV.		
ED – Estatística descritiva básica	Engloba a análise dos dados com o auxílio da estatística clássica, tais como: média, mediana, desvio padrão e variância.		
EB – Estatística <i>Bayesiana</i>	Algumas incertezas subjetivas podem seguir uma frequência de ocorrência e serem tratadas com o uso da estatística básica.		
MC – Modelagem de cenário	A avaliação de diferentes cenários permite observar os reflexos das escolhas nos resultados do estudo ACV.		
AS – Análise de sensibilidade	Recomendada para identificar quais dados de entrada apresentam maior contribuição na incerteza do resultado, bem como quais os efeitos nos resultados de um estudo em função dos métodos e dados selecionados.		
MD – Modelos detalhados	Melhorar a estrutura dos modelos e a sua parametrização pode resultar em melhor compreensão e caracterização dos erros.		
MA – Medidas adicionais	Os erros aleatórios de uma amostra podem ser reduzidos com o aumento do número de medições.		
EP – Estimativa de parâmetros	Dados obtidos em referências da literatura ou estimados com base em processos de sistemas semelhantes.		
IQD – Ind. de qualidade dos dados	Parâmetros atribuídos aos dados de inventário e que permitem aferir a sua qualidade global.		

Fonte: Baseado em IPCC (2006a), ABNT NBR ISO 14040 (2014) e Huijbregts (1998)

Tabela 2.7 - Estudos de ACV de rodovias com a quantificação e análise de incertezas

Ref.	País	Fases ACV	Objetivo	Incerteza				
				Parâmetro	Cenário	Modelo	Técnica	Software
(Abed et al., 2023)	Inglaterra	M, C, U, F	Quantificar e incorporar incertezas associadas à durabilidade da superfície de pavimentos asfálticos nos resultados de ACV.	✓			Sensibilidade Monte Carlo ¹ Estatística	SimaPro
(Bressi; Primavera; Santos, 2022)	Itália	M	Comparar os impactos ambientais entre soluções de pavimento rígido e flexível com a análise de incertezas.	✓	*		Sensibilidade Monte Carlo ¹	N.A.
(Mattinzioli et al., 2021)	Espanha	M, C	Investigar a influência da variabilidade e incerteza dos dados nos resultados ACV de pavimentos de asfalto.	✓	*		Sensibilidade Monte Carlo ¹	N.A.
(Cao et al., 2019)	China	M, C, R, F	Estudo ACV com incertezas na análise comparativa de soluções de pavimento asfáltico com resíduos de pneu.	✓			Sensibilidade Monte Carlo	N.A.
(Ziyadi; Al-Qadl, 2019)	Alemanha	U	Estabelecer uma metodologia de estudo de ACV com a análise individualizada de diferentes tipos de incerteza e aplicá-la em um estudo de caso de operação de uma rodovia.	✓	✓	✓	Monte Carlo ¹ Machine L. Inf. Bayesian Sensibilidade	N.A.
(Yoo; Ozer; Ham, 2019)	EUA	M	Quantificar as incertezas e os impactos ambientais nos principais processos de construção de pavimentos.	✓	*		AHP Monte Carlo ¹	SimaPro
(Yu; Liu; Gu, 2018)	China	M	Calcular o consumo de energia primária na produção de materiais de pavimentação com a inclusão de incertezas nos resultados.	✓	*		AHP Monte Carlo ¹	Crystal Ball
(Azarijafari; Yahia; Amor, 2018)	Canadá	M, C, R, F	Avaliar os efeitos individuais e combinados da incerteza e variabilidade dos dados na comparação ACV de pavimentos rígido e flexível.	✓	✓		Sensibilidade Monte Carlo ¹	SimaPro
(Umer et al., 2017)	Canadá	R	Avaliar os impactos ambientais e custos de três tipos de pavimentos com a quantificação de incertezas.	✓			Fuzzy	N.A.
(Liu; Wang; Li, 2017)	China	M, C	Quantificar a emissão de CO ₂ com incertezas para distintos pavimentos rígido e flexível.	✓	*		Estatística	N.A.
(Gregory et al., 2016)	EUA	M, C, R, F	Propor uma metodologia de ACV com incertezas e aplicá-la em um estudo de caso de pavimentos.	✓			Monte Carlo ¹ Sensibilidade	N.A.
(Noshadravan et al., 2013)	EUA	R	Análise ACV entre pavimentos rígido e flexível com a quantificação de incertezas dos dados de entrada.	✓			Monte Carlo ¹	N.A.

Nota ¹ Houve o emprego combinado das técnicas de índice de qualidade dos dados e de simulação probabilística. M – extração de matérias-primas, transporte e produção dos materiais; C – transporte e construção das obras; R – reparo e manutenção; U – uso/operação da vida; F- fim de vida. * Tipo de incerteza que não foi declarada de forma explícita, mas que aparentemente foi considerada no estudo; N.A. - informação não apresentada.

Fonte: Autor.

2.3.3 Técnica selecionada 1: Método indicadores de qualidade dos dados

Weidema e Wesnaes (1996) desenvolveram uma ferramenta para avaliar a qualidade dos dados individuais utilizados na avaliação do ciclo de vida. Essa avaliação é feita por meio de um conjunto de indicadores independentes que especificam aspectos sobre a qualidade dos dados coletados. Esses indicadores podem ser usados para avaliar a consistência do inventário em relação aos requisitos estabelecidos na fase de objetivo e escopo do estudo, identificando oportunidades para melhorar a qualidade dos dados e rastreando as principais fontes de incerteza dos resultados de ACV.

Os indicadores propostos por Weidema e Wesnaes (1996) estão divididos em dois grupos: os que não dependem do estudo no qual os dados serão aplicados e os que dependem do objetivo e escopo do estudo. A seguir, estão descritos os indicadores associados a cada um desses grupos.

Indicadores independentes:

- a) **Confiança na fonte:** está relacionado aos métodos de aquisição e procedimentos de verificação utilizados na obtenção dos dados. Trata-se de um indicador independente do estudo no qual os dados serão aplicados, pois uma decisão tomada durante a fase de objetivo e escopo não afeta a confiabilidade da fonte de informação utilizada, e
- b) **Completo:** diz respeito às propriedades estatísticas dos dados, incluindo a representatividade da amostra, se a amostra tem um número suficiente de dados e se o período é adequado para compensar flutuações normais. Esses parâmetros amostrais não podem ser influenciados pelas condições estabelecidas na fase de objetivo e escopo do estudo, sendo, portanto, um indicador independente.

Indicadores dependentes:

- a) **Correlação temporal:** está relacionado à diferença entre o ano do estudo e o ano dos dados. Sendo assim, este indicador pode ser alterado pelo ano de referência do estudo;
- b) **Correlação geográfica:** aponta a correlação entre a área do estudo e a região geográfica da qual os dados coletados são originários, e

- c) **Correlação tecnológica:** engloba todos os outros aspectos de correlação além do temporal e geográfico, já que os dados podem ser atuais e representativos da área geográfica desejada, mas podem não refletir as empresas, processos ou materiais específicos em estudo.

A partir dos indicadores listados, Weidema e Wesnaes (1996) atribuíram pontuações específicas a eles, em uma escala que varia de 1 a 5, de acordo com critérios previamente estabelecidos. A associação entre os indicadores e a escala de pontuação foi realizada por meio de uma matriz de qualidade dos dados, conhecida como Matriz Pedigree, apresentada na Tabela 2.8. Os resultados dessa matriz podem ser expressos da seguinte maneira: (3, 2, 4, 1, 5), onde cada pontuação está associada a um indicador e segue a ordem de leitura da referida tabela, começando pelo indicador confiança na fonte e terminando no indicador correlação tecnológica. Na presente pesquisa, a pontuação 1 será considerada a de menor qualidade (maior incerteza) e a 5 como a de maior qualidade (menor incerteza), conforme adotado por Canter *et al.* (2002); Hong *et al.* (2016); Kennedy, Montgomery e Quay (1996), e Yu, Wang e Gu (2018). Além disso, seguindo a convenção adotada pela bibliografia consultada, a avaliação qualitativa dos dados dos estudos de ACV com base na abordagem da Matriz Pedigree será considerada sinônimo de Método IQDs.

Apesar de a Matriz Pedigree fornecer uma avaliação baseada em números, a sua pontuação deve ser interpretada como semiquantitativa. De acordo com Weidema e Wesnaes (1996), isso se deve ao fato de que os números servem apenas como uma forma de representação, e não devem ser considerados como uma “quantidade” de qualidade dos dados.

A análise qualitativa dos dados do estudo de ACV conforme a Matriz Pedigree pode variar em termos de organização e modo de uso. A literatura apresenta algumas alterações na quantidade de indicadores e nos critérios de pontuação da matriz original criada por Weidema e Wesnaes (1996) (Edelen; Ingwersen, 2016; Lea; Harvey, 2021; Mark A.J. Huijbregts *et al.*, 2001). Quanto ao modo de uso, há abordagens que consideram a necessidade de avaliar individualmente a qualidade dos dados de entrada críticos dos processos unitários presentes em um sistema de produto, a exemplo do que é realizado na base de dados *Ecoinvent* (Weidema B P *et al.*, 2013), enquanto outras buscam compreender os critérios gerais adotados para o desenvolvimento de um determinado inventário, e atribuem posteriormente as pontuações dos indicadores da Matriz Pedigree diretamente aos

fluxos de saída do sistema de produto, como empregado na ferramenta *LCA Pave* da FHWA (Meijer *et al.*, 2021).

Tabela 2.8 - Matriz de qualidade dos dados (Matriz Pedigree)

Pontuação indicador	5	4	3	2	1
Indicadores independentes do estudo no qual os dados serão aplicados					
Confiança na fonte	Dados verificados ¹ baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas ou informações teóricas	Estimativa qualificada ou dados derivados de informações teóricas	Estimativa não qualificada
Compleitude	Dados representativos de todos os locais relevantes para o aspecto e com período adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o aspecto considerado com períodos adequados para compensar flutuações	Dados representativos de somente alguns locais (<<50%) relevantes para o aspecto considerado ou > 50% dos locais, mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local representativo para o aspecto considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos
Indicadores dependentes do objetivo e escopo do estudo no qual serão aplicados					
Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença
Correlação Geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída	Dados de uma área menor que a área do estudo, ou de área similar	--	Dados de área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção
Correlação Tecnológica	Dados de empreendimentos, processos e materiais em estudo (p.ex.: tecnologia idêntica)	--	Dados de processos ou materiais, mas com mesma tecnologia, ou dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes tecnologias	Dado de processos ou materiais em estudo, mas tecnologias diferentes, ou dados em processos em escala laboratorial de mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escala laboratorial de diferente tecnologia.

Nota ¹ A verificação pode ser realizada de diversas maneiras: checagem *in-loco*, pelo recálculo, por balanço de massa ou checagem cruzada com outras fontes.

Fonte: Adaptado de Weidema e Wesnaes (1996) e Wang e Shen (2013).

Apesar das diferenças mencionadas anteriormente, é possível notar na literatura que a Matriz Pedigree é utilizada como uma técnica para avaliar a qualidade dos dados do inventário e, a partir dessa avaliação, converter os modelos de ACV com resultados de estimativas pontuais

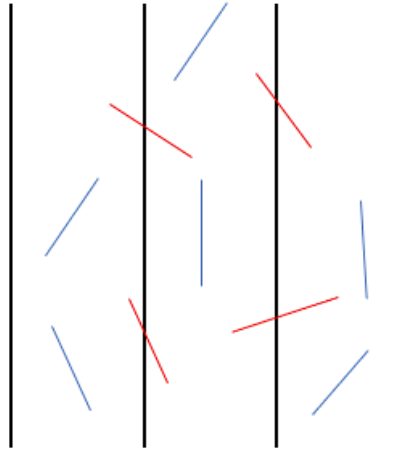
não variáveis (ou seja, modelos determinísticos) em modelos que produzem resultados variáveis que podem ser caracterizados por distribuições de probabilidade (ou seja, modelos estocásticos) (Canter *et al.*, 2002; Hong *et al.*, 2016; May; Brennan, 2003; Wang; Shen, 2013; Yu; Wang; Gu, 2018; Mark A.J. Huijbregts *et al.*, 2001). De acordo com Kennedy, Montgomery e Quay (1996), o objetivo dessa conversão é obter uma representação quantitativa da incerteza a partir do julgamento qualitativo obtido com a Matriz Pedigree.

É possível notar ainda que a conversão entre os modelos de ACV determinístico para probabilístico pode ser feita de duas maneiras principais. A primeira maneira é com a análise estatística de uma amostra representativa dos dados populacionais, visando obter valores extremos de uma distribuição de probabilidade com formato conhecido e cujos resultados variam conforme a escala de pontuação da Matriz Pedigree (Ciroth; Muller; Weidema, 2016). A segunda maneira, em um cenário em que não há dados amostrais representativos da população, é utilizar a opinião de especialistas para estabelecer, a partir da média das pontuações atribuídas aos indicadores da Matriz Pedigree, uma distribuição de probabilidade para o dado ambiental determinístico, com um formato de curva e valores extremos correspondentes (Canter *et al.*, 2002; Hong *et al.*, 2016; May; Brennan, 2003; Wang; Shen, 2013; Yu; Wang; Gu, 2018). Os detalhes sobre essa última forma de conversão, incorporada ao Modelo de ACV desta pesquisa, são apresentados na próxima seção.

2.3.4 Técnica selecionada 2: Método Monte Carlo

Segundo Sobol (1994), o Método Monte Carlo (MMC) pode ser definido de maneira simplificada como uma técnica para resolver problemas matemáticos por meio da simulação de variáveis aleatórias. Uma forma intuitiva de compreender essa definição é por meio de um estudo hipotético, exemplificado por Dunn e Shultis (2010) e ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Grade de linhas paralelas com dez agulhas lançadas aleatoriamente



Fonte: Baseado em Dunn e Shultis (2010).

Na situação representada na Figura 2.13, 10 agulhas com comprimento L são lançadas aleatoriamente sobre uma superfície plana com 4 linhas paralelas espaçadas com uma medida “D” arbitrada em $D = 0,6 L$. Nessa simulação, a probabilidade (P_c) de que uma agulha corte ou intercepte uma das linhas paralelas pode ser expressa como:

$$P_c = \frac{2L}{\pi D} \quad (2.1)$$

Adicionalmente, a Equação 2.1 pode ser utilizada para estimar o número π . Isso ocorre porque os parâmetros L e D são conhecidos, e o valor de P_c pode ser estimado alternativamente a partir dos resultados obtidos no lançamento aleatório das 10 agulhas. No caso exemplificado, 4 entre 10 agulhas lançadas interceptaram uma das linhas paralelas. Com os resultados dessa simulação, a equação anterior pode ser reformulada para fornecer o número estimado de π da seguinte forma:

$$\pi = \frac{2L}{P_c D} \approx \frac{2 (0,6 D)}{\left(\frac{4}{10}\right) D} = 3,0 \quad (2.2)$$

Segundo Dunn e Shultis (2010), o fenômeno de lançar agulhas pode ser interpretado como uma simulação de outro fenômeno, estimar o valor de π . A precisão do resultado aumenta com mais lançamentos aleatórios de agulhas. Em outros termos, a partir de um modelo probabilístico construído artificialmente e influenciado por uma variável aleatória (também conhecida como estocástica), foi possível obter o resultado estimado de um problema matemático, sendo que o erro estatístico do resultado é reduzido com o acréscimo de repetições. Esse processo demonstra o princípio básico que fundamenta a aplicação do MMC na resolução de problemas matemáticos complexos.

O MMC baseia-se em dois teoremas matemáticos: a lei dos grandes números e o teorema do limite central (Dunn; Shultis, 2010; Kalos; Whitlock, 2008; Kawano; Paiva, 2023; Mun, 2006; Ross, 2010; Sobol, 1994). Contudo, antes de explorar esses teoremas e definir a estrutura do MMC, alguns conceitos e terminologias relacionados à teoria das probabilidades devem ser compreendidos.

2.3.4.1 Conceitos e terminologias sobre a teoria das probabilidades

Espaço amostral e variável aleatória

O espaço amostral é o conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório, sendo que para descrever esse experimento, são atribuídos valores numéricos aos seus elementos. A variável aleatória pode ser definida como aquela que atribui um valor único para cada elemento do espaço amostral, sendo este valor determinado aleatoriamente (Fávero; Belfiore, 2022). As variáveis aleatórias podem ser discretas ou contínuas. No âmbito desta pesquisa, apenas variáveis aleatórias contínuas serão consideradas.

Uma variável aleatória contínua é aquela cujo conjunto de valores num determinado intervalo pode assumir diversos números reais. Dessa forma, pode-se dizer que X é uma variável aleatória contínua se existir uma função não negativa $f(x)$, definida para todo número real $x \in (-\infty, \infty)$, e que tenha satisfeita para qualquer conjunto B de números reais o que segue (Ross, 2010):

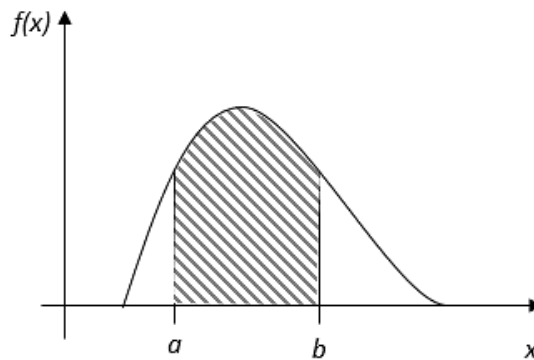
$$P\{X \in B\} = \int_B f(x) dx \quad (2.3)$$

A função $f(x)$ da Equação 2.3 é denominada de função densidade de probabilidade (FDP) da variável aleatória X . Para qualquer a e b , tal que $\{-\infty < a < b < +\infty\}$, a probabilidade de que a variável X assumira valores nesse intervalo é:

$$P\{a \leq X \leq b\} = \int_a^b f(x)dx \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 pode ser representada graficamente, conforme ilustrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Probabilidade de X assumir valores no intervalo $[a, b]$



Fonte: Adaptado de Ross (2010).

Esperança

A esperança (também conhecida como valor esperado ou médio) de uma variável aleatória contínua X com função densidade de probabilidade $f(x)$ é expressa por:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx \quad (2.5)$$

De acordo com Fávero e Belfiore (2022), a esperança pode ser entendida como uma média ponderada dos valores possíveis que a variável aleatória X pode assumir. Nessa média, a ponderação é determinada pelas probabilidades associadas a cada valor possível de X .

Variância

A variância descreve a dispersão da variável aleatória contínua X com função densidade de probabilidade $f(x)$ e pode ser calculada como:

$$Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^2 f(x)dx \quad (2.6)$$

A variância de uma variável aleatória é a média ponderada das distâncias entre os valores que X pode assumir e a esperança de X , em que os pesos são as probabilidades dos possíveis

valores de X . Portanto, quanto maior a variância maior a dispersão dos dados (Fávero; Belfiore, 2022; Ross, 2010).

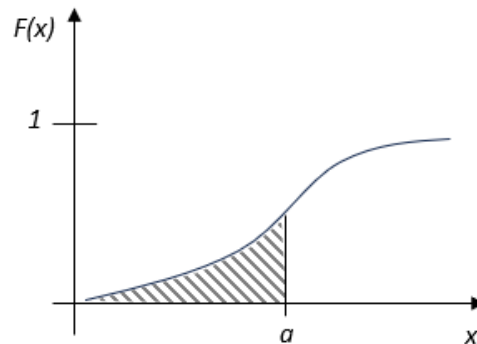
Função de distribuição acumulada

A função de distribuição acumulada (FDA) de uma variável aleatória contínua X é denotada por $F(x)$ e expressa por (Fávero; Belfiore, 2022).:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (2.7)$$

O valor de $F(x)$ representa a probabilidade de uma variável aleatória X assumir um valor entre $-\infty$ e a . As seguintes propriedades são válidas para essa função: $0 \leq F(x) \leq 1$; $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$; $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$; $a < b \rightarrow F(a) \leq F(b)$. A representação gráfica da FDA de uma variável aleatória contínua consta na Figura 2.15.

Figura 2.15 - FDA de uma variável aleatória contínua



Fonte: Adaptado de Fávero e Belfiore (2022).

Tipos selecionados de distribuição de probabilidade

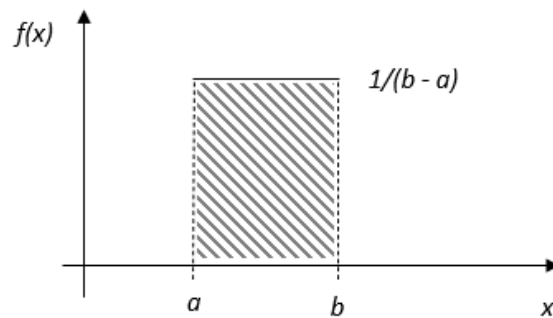
A distribuição de probabilidade para variáveis aleatórias contínuas pode assumir diferentes formatos, como a distribuição uniforme, beta, normal, exponencial, gama, entre outros (Dunn; Shultis, 2010; Fávero; Belfiore, 2022; Ross 2010; Kawano; Paiva, 2023). São de interesse desta pesquisa apenas os três primeiros formatos de distribuição, descritos a seguir.

- a. **Distribuição uniforme:** utilizada para modelar a ocorrência de eventos cuja probabilidade é constante em intervalos de mesma amplitude. Uma variável aleatória X tem distribuição uniforme no intervalo $[a, b]$, denotada por $X \sim U [a, b]$, se sua FDP for dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{(b-a)}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.8)$$

A Equação 2.8 pode ser representada graficamente pela Figura 2.16.

Figura 2.16 - Distribuição uniforme no intervalo $[a, b]$



Fonte: Adaptado de Fávero e Belfiore (2022).

- b. **Distribuição beta:** uma variável aleatória contínua tem uma distribuição beta se sua FDP for dada por:

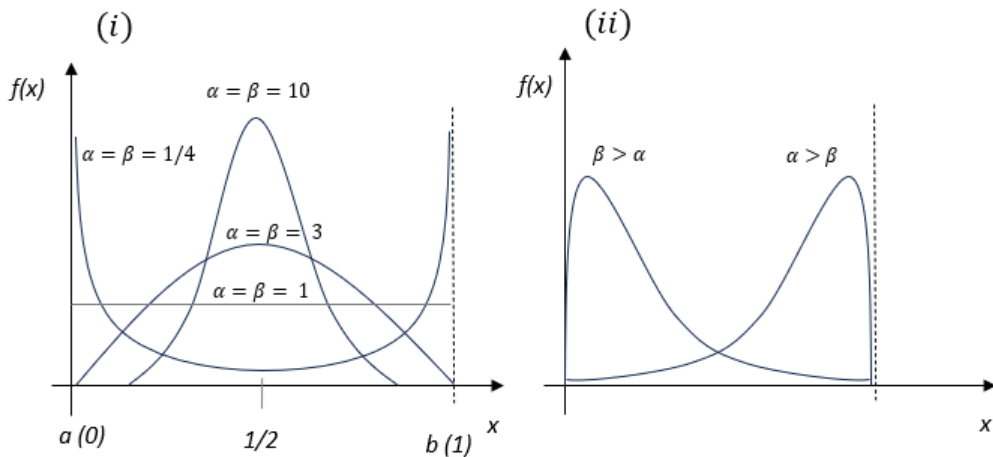
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\beta - \alpha)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, & \text{se } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.9)$$

Onde:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$$

Segundo Ross (2010), a distribuição beta é empregada na modelagem de fenômenos aleatórios com um conjunto de valores possíveis num intervalo finito $[a, b]$. Se considerada a como a origem e $(b-a)$ uma unidade de medida, é possível normalizar esse intervalo para $[0, 1]$. Cita ainda que, quando $\alpha = \beta$ (também conhecidos como parâmetros de forma da curva), a sua FDP é simétrica em torno de $\frac{1}{2}$, atribuindo mais peso às regiões em torno de $\frac{1}{2}$ à medida que o valor absoluto de seus parâmetros aumenta, conforme ilustrado na Figura 2.17.(i). Quando $\beta > \alpha$, a curva inclina-se para a esquerda, e se $\alpha > \beta$, a curva inclina-se para a direita (Figura 2.17.(ii)).

Figura 2.17 - Função de distribuição beta com parâmetros (i) $\alpha = \beta$ e (ii) $\alpha \neq \beta$



Fonte: Adaptado de Ross (2010).

A FDP beta pode variar em sua forma de apresentação, e uma das parametrizações possíveis é expressá-la em associação com outro tipo de função de probabilidade, chamada gama e denotada por $\Gamma(x)$. Dessa forma, a expressão da Equação 2.9 pode ser reescrita como:

$$f(x; \alpha, \beta, a, b) = \begin{cases} \left[\frac{1}{(b-a)} \right] \cdot \left[\frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \right] \cdot \left[\frac{(x-a)}{(b-a)} \right]^{\alpha-1} \cdot \left[\frac{(b-x)}{(b-a)} \right]^{\beta-1}, & \text{se } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.10)$$

A expressão da Equação 2.10 é uma das alternativas empregadas em diversos estudos anteriores (Canter *et al.*, 2002; Hong *et al.*, 2016; May; Brennan, 2003; Wang; Shen, 2013; Yu; Wang; Gu, 2018) para construir as FDPs de entrada dos modelos de cálculo ACV com base no valor do Indicador de Qualidade dos Dados (IQD), obtido a partir da Matriz Pedigree. A Tabela 2.9 apresenta as relações entre os parâmetros da função beta e os valores possíveis do IQD.

Tabela 2.9 - Parâmetros da FDP do tipo beta com base no IQD ¹

IQD	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
(α, β)	(5,5)	(4,4)	(3,3)	(2,2)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)
Intervalo									
(a, b)²	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Z (+/-)									

Nota ¹ O valor do IQD é definido a partir da média aritmética simples das pontuações atribuídas aos 5 indicadores da Matriz Pedigree. Nota ² Os pontos finais do intervalo são obtidos com base nas seguintes expressões: $a = (1 - Z) \times (d.ICV)$ e $b = (1 + Z) \times (d.ICV)$, onde $d.ICV$ é o dado ambiental determinístico e atribuído como o valor médio da FDP de entrada do modelo de cálculo ACV.

Fonte: Adaptado de Canter *et al.* (2002).

A Tabela 2.9 demonstra que, com o aumento da pontuação do IQD, ou seja, com a melhoria da qualidade dos dados do ICV, o intervalo de distribuição da curva FDP torna-se mais estreito e centralizado em torno da média, o que indica que dados de alta qualidade apresentam um grau de dispersão menor, logo refletindo em uma menor incerteza.

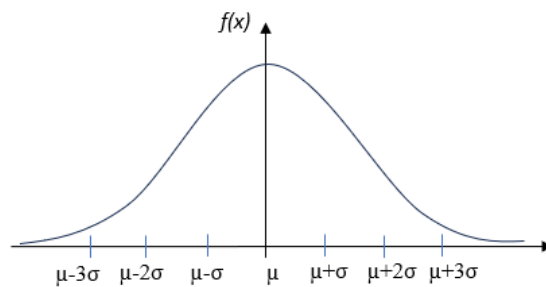
De acordo com Canter *et al.* (2002), a preferência pela função beta se deve, sobretudo, ao fato de que os parâmetros de forma da curva (α, β) e os pontos finais do intervalo (a, b) permitem a representação de uma ampla variedade de distribuição de probabilidade, como é demonstrado na Figura 2.17. Pode-se notar, inclusive, que a distribuição uniforme é um tipo especial de distribuição beta quando $\alpha = \beta = 1$.

c. **Distribuição normal:** uma variável aleatória X com média $\mu \in \mathfrak{R}$ e desvio padrão $\sigma > 0$ tem uma distribuição normal, também conhecida como distribuição Gaussiana, representada por $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, se a sua FDP for dada por (Fávero; Belfiore, 2022; Ross, 2010):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (2.11)$$

A Equação 2.11 pode ser representada graficamente, conforme ilustrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Distribuição normal



Fonte: Adaptado de Fávero e Belfiore (2022).

A partir da Figura 2.18, pode-se notar que a curva tem um formato de sino e é simétrica em relação à média (μ), e quanto menor o desvio padrão (σ), maior a concentração dos resultados em torno da média (Fávero; Belfiore, 2022). Na distribuição normal, a esperança e a variância de X são dadas por:

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2.12)$$

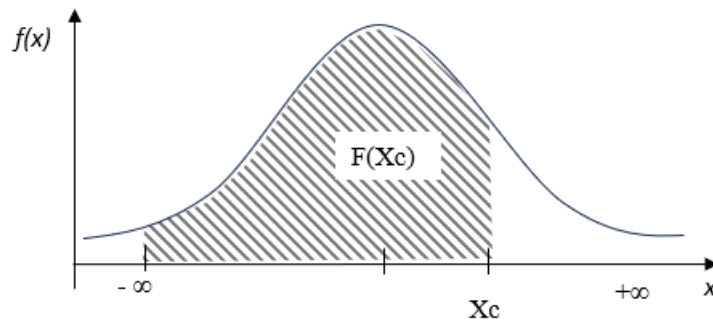
$$Var(X) = \sigma^2 = E(X^2) - [E(X)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^2 f(x) dx \quad (2.13)$$

A função de distribuição acumulada $F(x_c)$ de uma variável aleatória X com distribuição normal é obtida com a integração da Equação 2.11 de $-\infty$ até x_c , ou seja:

$$F(x_c) = P(X \leq x_c) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_c} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.14)$$

A integral da expressão anterior é representada pela área hachurada na Figura 2.19, sendo que a probabilidade de a variável X ser menor ou igual ao valor de x_c corresponde ao valor da área sob a curva de $f(x)$ entre $-\infty$ e x_c .

Figura 2.19 - Representação gráfica de $P(X \leq x_c)$ para uma variável aleatória com distribuição normal



Fonte: Adaptado de Fávero e Belfiore (2022).

A FDP da distribuição normal (Equação 2.11) pode ser reformulada a partir da transformação da variável original X em uma outra variável, denotada como Z e dita variável aleatória normal padrão, com média zero ($\mu = 0$) e variância 1 ($\sigma^2 = 1$) (Ross, 2010). Essa nova variável é dada pela seguinte função linear:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0,1) \quad (2.15)$$

O emprego da variável aleatória Z na Equação 2.14 resulta na FDA da distribuição normal padrão:

$$F(z_c) = P(Z \leq z_c) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \leq z_c\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_c} e^{-\frac{z}{2}} dz \quad (2.16)$$

A variável Z representa o número de desvios-padrão que separa uma variável aleatória X da média. O lado direito da Equação 2.16 possibilita delimitar o intervalo de confiança (IC) dos

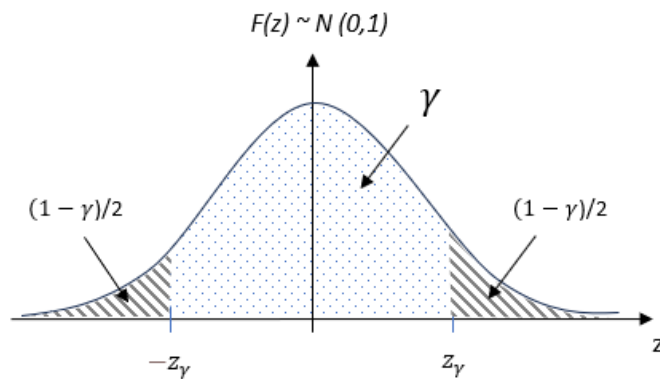
parâmetros da população ou da distribuição. O IC pode ser descrito da seguinte forma (Montgomery; Runger, 2015):

- a) Se X é uma variável aleatória com distribuição normal, com variância conhecida (σ^2) e média desconhecida (μ), um IC, denotado por γ , para $\mu \in \mathfrak{R}$ é dado por:

$$P(-z_\gamma \leq Z \leq z_\gamma) = P\left(-z_\gamma \leq \frac{X - \mu}{\sigma} \leq z_\gamma\right) = \gamma \quad (2.17)$$

A expressão da Equação 2.17 pode ser representada graficamente, conforme ilustrado na Figura 2.20.

Figura 2.20 - Distribuição normal padrão com indicação do IC (γ)



Fonte: Montgomery e Runger (2015).

A partir da distribuição normal padrão (Equação 2.16) é possível estabelecer para cada z_γ o correspondente valor de γ , independentemente dos parâmetros da população ou da distribuição (Montgomery; Runger, 2015). Em um caso específico, para $z_\gamma = 1,96$, tem-se um intervalo de confiança padrão de 0,95 ou 95%. Em seguida, é possível determinar os valores da curva de distribuição que delimitam o IC (γ) da seguinte forma:

$$\left(-z_\gamma \leq \frac{X - \mu}{\sigma} \leq z_\gamma\right) = (X - z_\gamma\sigma \leq \mu \leq X + z_\gamma\sigma) \quad (2.18)$$

No exemplo do IC (γ) de 95%, os valores limites da distribuição estão definidos em $[X - 1,96\sigma \leq \mu \leq X + 1,96\sigma]$. Dessa forma, é possível notar que, quanto maior o desvio padrão σ , maior a amplitude da base da curva de distribuição para um mesmo valor de IC, o que torna possível realizar comparações entre diferentes curvas de distribuição (Fávero; Belfiore 2022). A aplicação dessa e de outras propriedades da distribuição normal no contexto do MMC é objeto de análise a seguir.

2.3.4.2 Lei dos grandes números

A lei dos grandes números é subdividida em duas vertentes: a lei fraca e a lei forte. O objetivo desta seção é descrever os principais conceitos teóricos dessas duas vertentes da lei para possibilitar uma compreensão adequada do MMC, sem, contudo, entrar na demonstração matemática de seus teoremas. As demonstrações matemáticas podem ser encontradas nas referências consultadas (Dunn; Shultis, 2010; Kalos; Whitlock, 2008; Kawano; Paiva, 2023; Ross, 2010; Sobol, 1994).

a) **Lei fraca dos grandes números:** seja X_1, X_2, \dots, X_n uma sequência de variáveis aleatórias e identicamente distribuídas, cada uma com média μ e variância $\sigma^2 < \infty$. Considere a nova variável aleatória \bar{X} representada por:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{S_n}{n}$$

O valor esperado $E(\bar{X})$ e a variância $V(\bar{X})$ da variável aleatória \bar{X} são dados por:

$$E(\bar{X}) = E\left[\frac{S_n}{n}\right] \rightarrow E(\bar{X}) = \mu \quad V(\bar{X}) = V\left[\frac{S_n}{n}\right] \rightarrow V(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n}$$

Então, para qualquer constante $\varepsilon > 0$:

$$P\left\{\left|\frac{S_n}{n} - \mu\right| \geq \varepsilon\right\} \rightarrow 0, \quad \text{quando } n \rightarrow \infty \quad (2.19)$$

De maneira simplificada, a lei fraca dos grandes números estabelece que a média amostral ($\bar{X} = S_n/n$) dos resultados $\{x_1 + x_2 + \dots + x_n\}$ de uma simulação das variáveis aleatórias X_1, X_2, \dots, X_n , converge para a média populacional (μ) à medida que o tamanho (n) da amostra aumenta. Em termos mais específicos, a Equação 2.19 afirma que a probabilidade de que a diferença entre a média amostral e a média populacional seja superior a uma constante qualquer ($\varepsilon > 0$) é zero à medida que n se aproxima do infinito (Kawano; Paiva, 2023; Ross, 2010).

b) **Lei forte dos grandes números:** seja X_1, X_2, \dots, X_n uma sequência de variáveis aleatórias e identicamente distribuídas, cada uma com média finita $\mu = E(X_i)$. Então, é possível afirmar com probabilidade de 1 que:

$$\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{S_n}{n} \rightarrow \mu, \quad \text{quando } n \rightarrow \infty$$

Então,

$$P \left\{ \frac{S_n}{n} = \mu \right\} \rightarrow 1, \quad \text{quando } n \rightarrow \infty \quad (2.20)$$

Em resumo, a lei forte dos grandes números afirma que a média amostral ($\bar{X} = S_n/n$) dos resultados $\{x_1 + x_2 + \dots + x_n\}$ de uma sequência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas converge, com probabilidade de 1, para a média daquela distribuição à medida que n tende ao infinito (Ross, 2010).

2.3.4.3 Teorema do limite central

O teorema do limite central é classificado pela literatura como um dos mais importantes teoremas da estatística (Dunn; Shultis, 2010; Kalos; Whitlock, 2008; Kawano; Paiva, 2023; Ross, 2010; Sobol, 1994). Em resumo, o teorema afirma que a soma de um elevado número de variáveis aleatórias independentes tem uma distribuição que é aproximadamente normal. Essa propriedade permite compreender, por exemplo, que frequências empíricas de muitas populações da natureza exibem curvas na forma de uma distribuição normal (Sobol, 1994).

O teorema do limite central pode ser anunciado da seguinte forma (Dunn; Shultis, 2010; Ross, 2010):

- a) Seja X_1, X_2, \dots, X_n uma sequência de variáveis aleatórias e identicamente distribuídas com média μ e variância σ^2 . Sendo $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$, uma nova variável aleatória Z_n dada por,

$$Z_n = \frac{S_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}, \quad \text{onde } \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = s \text{ (desvio padrão da amostra)}$$

converge em distribuição normal padrão, $Z \sim N(0,1)$, quando n tende ao infinito. Logo, para $-\infty \leq z_\gamma \leq \infty$, é possível estabelecer:

$$P \left\{ \frac{|\bar{X} - \mu|}{\sigma/\sqrt{n}} \leq z_\gamma \right\} = P \left\{ \bar{X} - z_c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + z_c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right\} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-z_\gamma}^{z_\gamma} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (2.21)$$

Uma forma de interpretar a Equação 2.21 e, conseqüentemente, compreender as implicações do teorema do limite central é mediante uma simulação numérica. Essa abordagem é descrita a seguir e ilustrada na Figura 2.21.

Exemplo de demonstração do teorema do limite central:

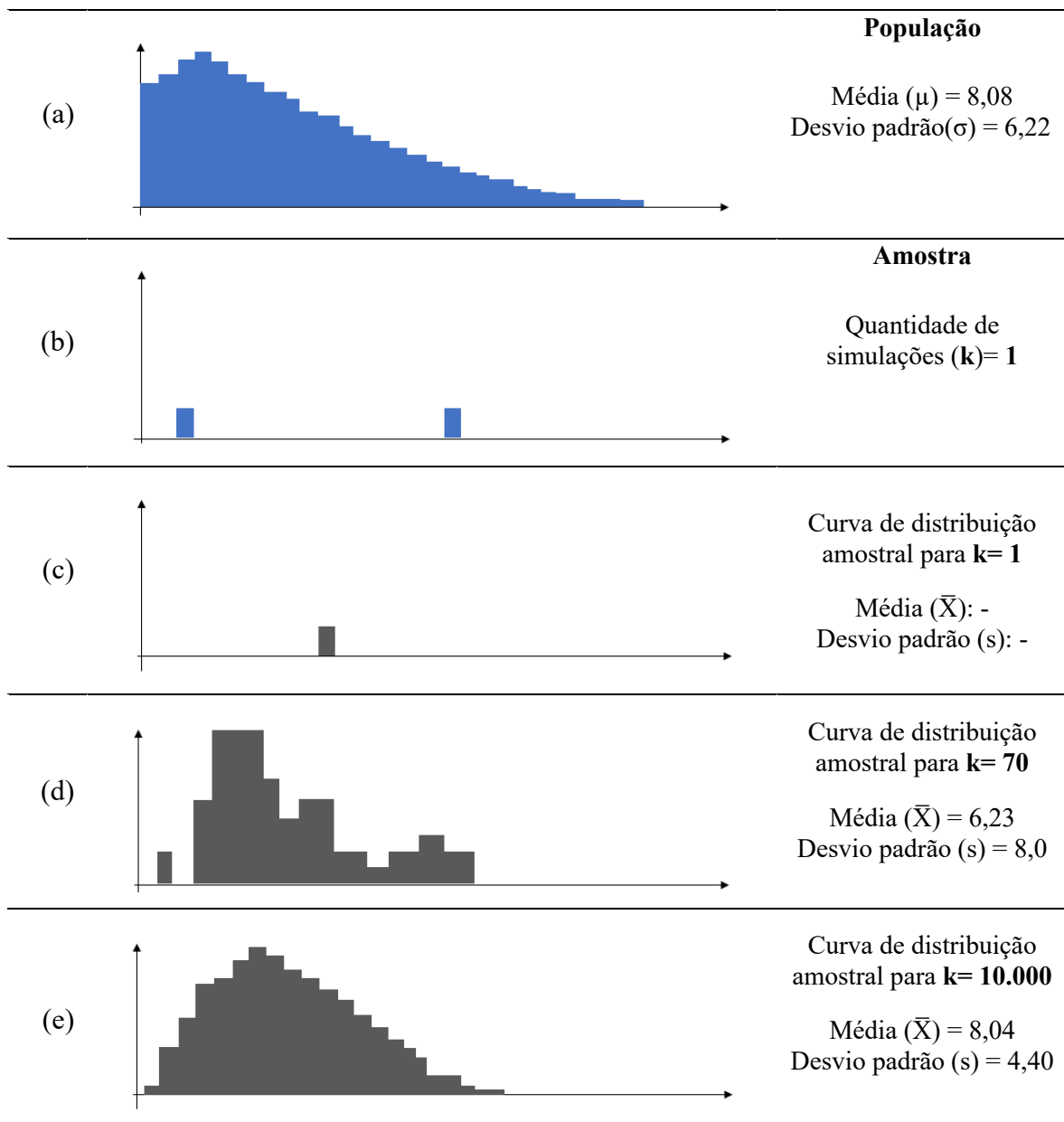
Considere uma população com desvio padrão (σ) e média (μ) conhecidos, cuja distribuição difere da normal (Figura 2.21.a). A partir dessa população, são retiradas amostras aleatórias. Cada amostra é composta pelo conjunto de 2 variáveis aleatórias e identicamente distribuídas (Figura 2.21.b), e a partir da média dos dados amostrados é possível iniciar a construção de uma curva de distribuição amostral (Figura 2.21.c). Esse procedimento é repetido k vezes, de modo que a quantidade n de dados amostrados é progressivamente acumulada — ou seja, na primeira simulação é formada uma amostra com $n = 2$ dados, na segunda simulação uma amostra com $n = 4$ dados (2 iniciais + 2 novos) e assim sucessivamente —, possibilitando obter uma nova curva de distribuição amostral à cada iteração, com os correspondentes valores amostrais da média (\bar{X}) e do desvio padrão (s) (Figura 2.21.d e Figura 2.21.e). Na Figura 2.21.e, a curva de distribuição formada está associada a 10.000 simulações, e o acréscimo de simulações resultaria em outras curvas que tendem a uma distribuição cada vez mais próxima da normal e com valores de \bar{X} cada vez mais próximos de μ .

A Figura 2.21 permite interpretar a Equação 2.21 e compreender as seguintes características do teorema do limite central (Dunn; Shultis, 2010; Kawano; Paiva, 2023; Sobol, 1994):

- a) Independentemente do tipo de distribuição utilizado para gerar as amostras aleatórias, contanto que ela tenha média finita, a média amostral terá uma distribuição aproximadamente normal para n grande;
- b) À medida que n aumenta, a média amostral se aproxima da média populacional, um resultado que corrobora a lei dos grandes números. Portanto, o teorema do limite central fortalece a lei dos grandes números, pois não só indica para onde a sequência de variáveis aleatórias converge, mas também fornece a forma de sua distribuição;
- c) Estabelecidos previamente z_γ e o seu correspondente intervalo de confiança (γ), e uma vez conhecido o desvio padrão populacional (σ), a única maneira de reduzir a amplitude da curva de distribuição amostral no intervalo definido por $[\bar{X} - z_\gamma \sigma / \sqrt{n}; \bar{X} + z_\gamma \sigma / \sqrt{n}]$ (Equação 2.21), é com o aumento da quantidade n de dados amostrados, o que pode ser alcançado com o acréscimo k de simulações. Dessa forma, a partir da relação σ / \sqrt{n} , também conhecida como erro padrão, fica evidente que conforme n tende ao infinito, o valor observado (\bar{X}) se aproxima do seu valor real (μ), já que, nessa condição, o erro padrão tende a zero, e

d) Dado que o erro padrão é proporcional a $1/\sqrt{n}$, para que a amplitude do intervalo do IC tenha alguma redução perceptível a partir de uma determinada quantidade n_i de dados amostrados, a próxima quantidade (n_{i+1}) deve ser o dobro da anterior. Isso significa que, após uma certa quantidade n_i , a amplitude do intervalo do IC entre as simulações subsequentes apresenta poucas alterações entre si. Assim, uma vez alcançada essa condição de estabilidade, é possível estimar a incerteza do valor observado (\bar{X}) a partir da medida da dispersão dos dados ou da amplitude do IC de sua curva de distribuição.

Figura 2.21 – Etapas de construção de uma distribuição amostral



Fonte: Baseado em Dunn e Shultis (2010); Kawano e Paiva (2023); Sobol (1994).

2.3.4.4 Estrutura do Método Monte Carlo

A rotina ilustrada na Figura 2.21 pode ser considerada um exemplo de aplicação dos conceitos do MMC, cujo princípio de funcionamento se baseia nos dois teoremas matemáticos apresentados anteriormente. Nesse exemplo, adotou-se como premissa que os parâmetros da distribuição de probabilidade da população são definidos, ou seja, com o desvio padrão (σ) e média (μ) conhecidos. No entanto, a principal aplicação do MMC está no contexto em que ambos os parâmetros populacionais μ e σ são desconhecidos, e ainda assim é possível estimar μ com uma margem de incerteza associada (Dunn; Shultis, 2010). Em resumo, isso pode ser feito da seguinte maneira:

- a) Estima-se uma FDP para a população, tendo como subsídio estudos estatísticos anteriores, a opinião de especialistas na área ou metodologias que possibilitem a sua construção, como o emprego da Matriz Pedigree (Canter *et al.*, 2002; Huijbregts, 1998; IPCC, 2006a; Weidema; Wesnaes, 1996), e
- b) A partir disso, a rotina ilustrada na Figura 2.21 pode ser executada. Contudo, como o desvio padrão populacional (σ) é desconhecido, o erro padrão σ/\sqrt{n} não pode ser definido com base nesse parâmetro populacional. Como alternativa e considerando os dois teoremas matemáticos utilizados pelo MMC, assume-se que o desvio padrão amostral (s) seja próximo do desvio populacional para n suficientemente grande. Com essa premissa, é possível reformular a Equação 2.21 e estimar, a partir da curva de distribuição amostral, o valor de μ com uma margem de incerteza associada (Dunn; Shultis, 2010).

Nas pesquisas relacionadas à ACV, é comum representar a incerteza dos resultados do MMC através do coeficiente de variação (CoV). (Abed *et al.*, 2023; EC-JRC, 2010; Hong *et al.*, 2016; IPCC, 2006a; Yu; Liu; Gu, 2018; Yu; Wang; Gu, 2018). O CoV é uma medida de dispersão relativa que fornece a variação dos dados em relação à média e pode ser calculado como (Fávero; Belfiore, 2022):

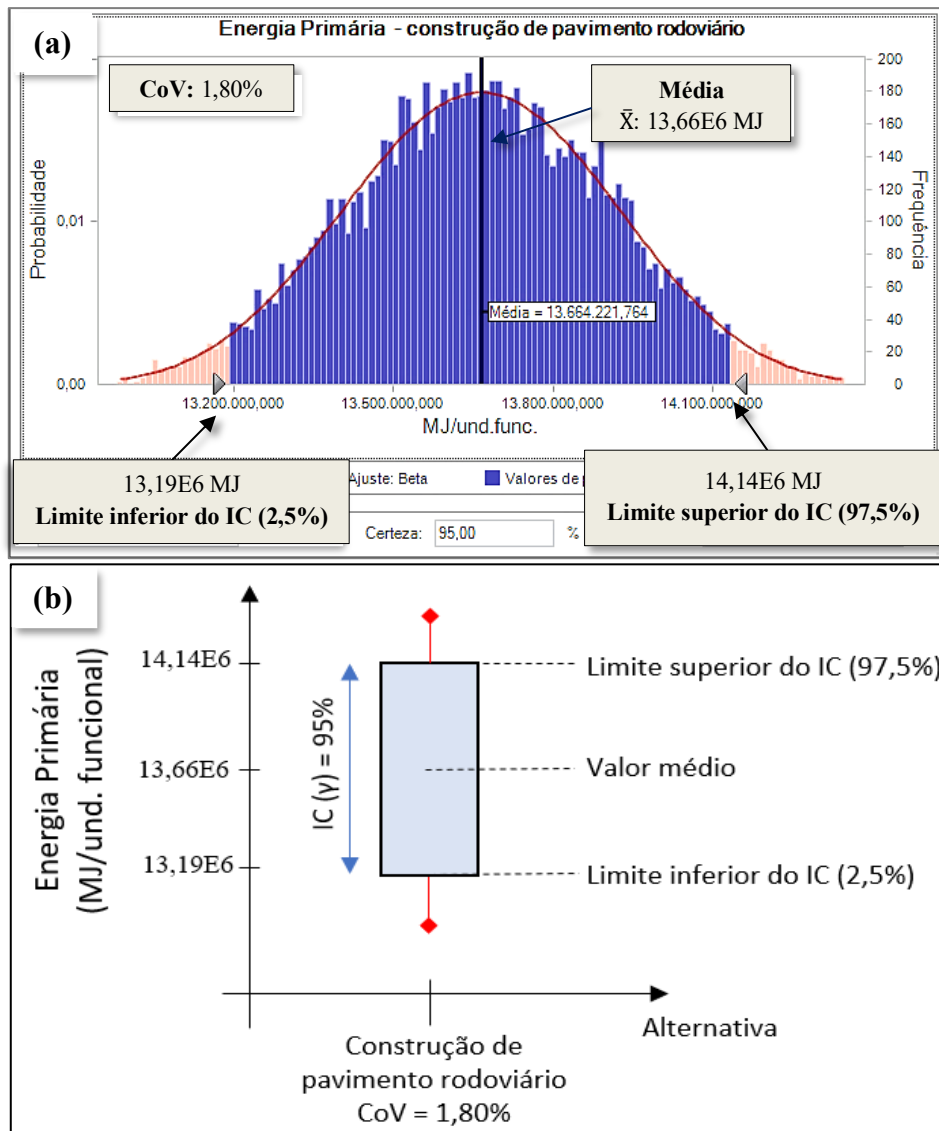
$$CoV(\%) = \frac{s}{\bar{X}} \quad (2.22)$$

Dessa forma, uma vez estabelecido o IC e identificada a estabilidade da curva de distribuição amostral após k simulações, a incerteza associada ao valor estimado de μ pode ser expressa pelo CoV da amostra (Equação 2.22). Fávero e Belfiore (2022) sugerem que um CoV

inferior a 30% pode ser considerado baixo, mas citam que esse critério pode variar conforme o contexto de aplicação. No que diz respeito ao IC, é recomendado que seja estabelecido em 95% (EC-JRC, 2010; IPCC, 2006a).

Por fim, a Figura 2.22 apresenta os principais conceitos discutidos sobre o MMC usando os resultados de uma simulação com 10.000 iterações para estimar a média de consumo de energia primária para a construção de um quilômetro de pavimento rígido rodoviário. São apresentados os valores limites para um IC(γ) de 95% (área azul), a média amostral (\bar{X}) e o CoV.

Figura 2.22 – Exemplificação dos resultados de uma simulação pelo MMC ¹: apresentação com curva de distribuição (a) e gráfico diagrama de caixa (b)



Nota ¹ Pode-se afirmar com uma confiança de 95% que o intervalo observado [13,19E6 MJ; 14,14E6 MJ] envolve o valor real da média μ , estimada em \bar{X} =13,66E6 MJ. A curva (a) segue um comportamento de distribuição normal com uma baixa dispersão relativa dos dados (CoV<30%).

Fonte: Autor.

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são apresentados os detalhes da metodologia desenvolvida para atingir os objetivos descritos na seção 1.2. Cabe salientar que não foram identificadas pesquisas anteriores na área rodoviária brasileira com uma abordagem semelhante à proposta neste estudo e que poderiam ser usadas como uma referência para o desenvolvimento da presente metodologia. Como alternativa, foram consideradas as metodologias propostas por Canter *et al.* (2002) e Hong *et al.* (2016) para a elaboração desta metodologia, com os complementos e adaptações necessários.

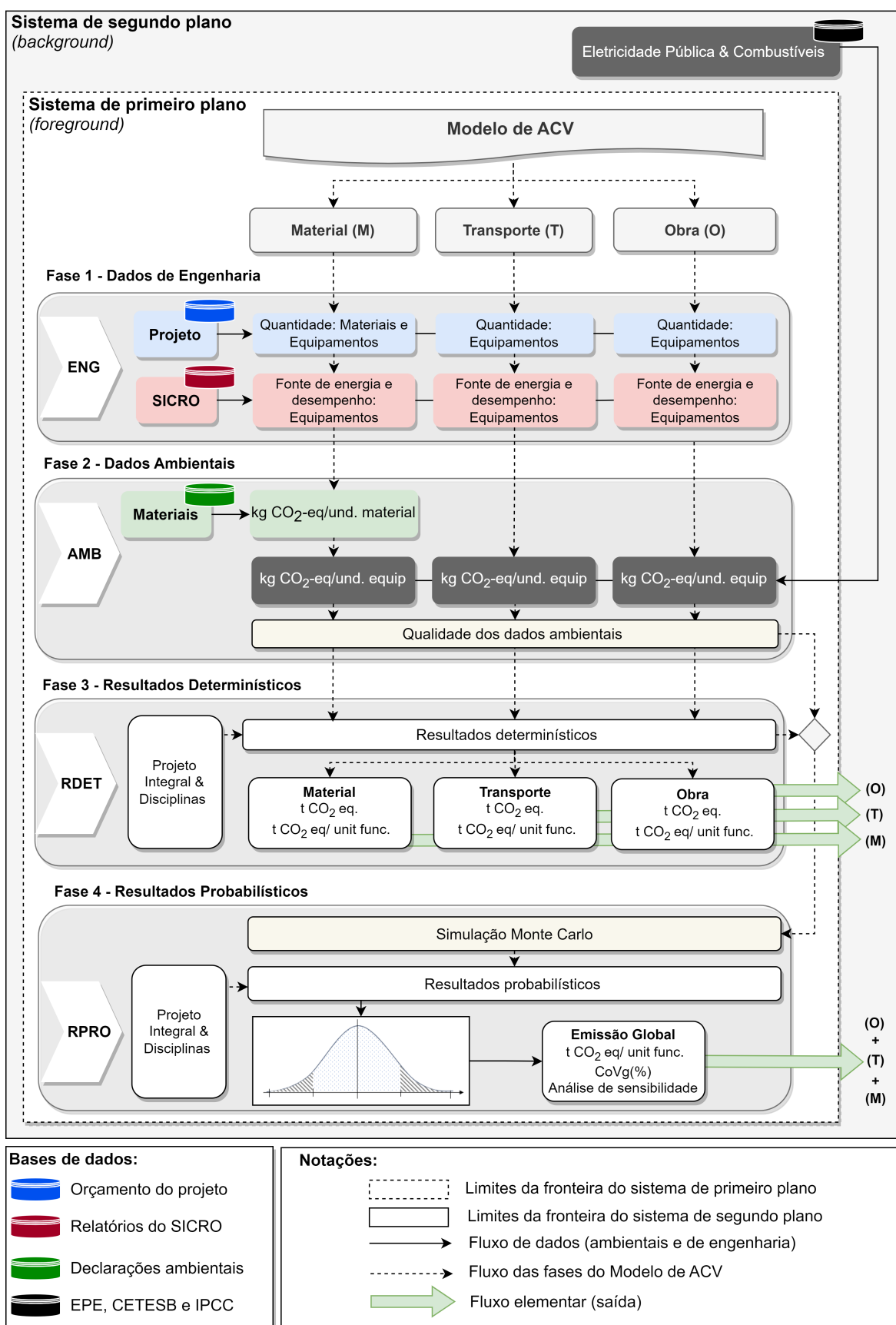
A presente metodologia aborda exclusivamente as incertezas de parâmetro e o uso das técnicas indicadores de qualidade de dados (Método IQDs) (seção 2.3.3) e MMC (seção 2.3.4) para a análise da qualidade dos dados ambientais do inventário e quantificação das incertezas envolvidas no estudo. De forma complementar, e como uma das saídas das simulações do MMC, os resultados são interpretados com o apoio da técnica de análise de sensibilidade com a finalidade de avaliar a influência das propriedades qualitativa e quantitativa dos dados de inventário nos resultados do Modelo de ACV.

Dado que um dos objetivos específicos desta pesquisa é comparar os resultados da utilização de dados ambientais do cimento *Portland* especificado no projeto do DNIT e produzido na região de execução das obras com os dados ambientais do tipo equivalente de cimento produzido nos EUA e na Europa, foram estabelecidos os seguintes cenários de análise:

- a) Cenário BR: cimento *Portland* CP II-F 32 produzido na região de execução das obras — declarante: VOTORANTIM CIMENTOS;
- b) Cenário EUR: cimento *Portland Composite Cement* CEM II produzido na Europa — declarante: CEMBUREAU (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION), e
- c) Cenário EUA: cimento *Blended cement types* (IP, IS, IL, IT) produzido nos Estados Unidos — declarante: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA).

Por fim, as interações entre as diversas fases da metodologia desenvolvida estão reunidas no Modelo de ACV, representado de forma esquematizada na Figura 3.1. As considerações a respeito de cada fase desse modelo, do projeto de engenharia do DNIT adotado como estudo de caso e dos critérios utilizados para a sua seleção constam nas próximas seções.

Figura 3.1 - Fluxograma do Modelo de ACV



Fonte: Baseado em Canter *et al.* (2002) e Hong *et al.* (2016).

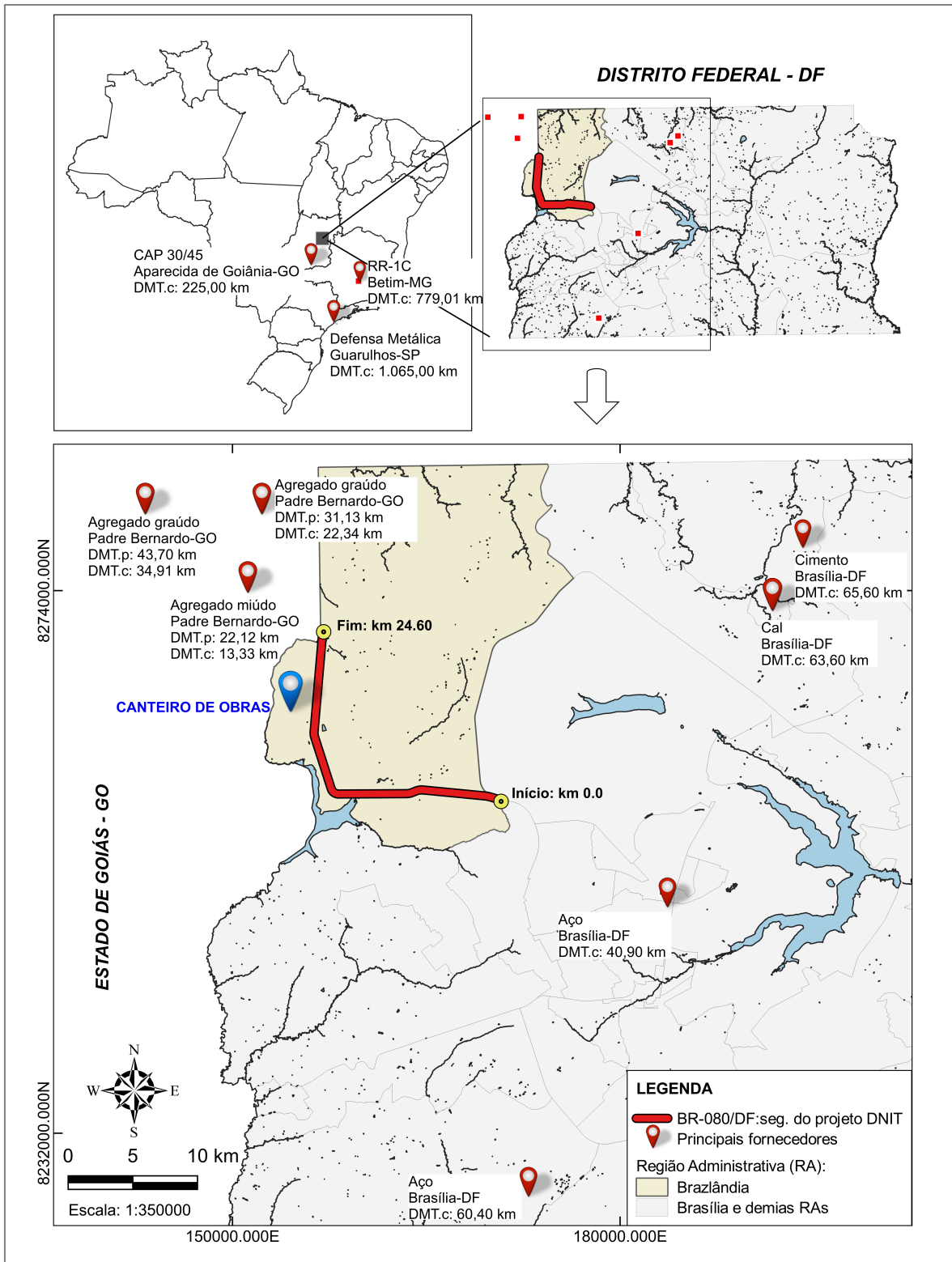
3.2 VISÃO GERAL DO ESTUDO DE CASO

O projeto de engenharia selecionado para o estudo de caso desta pesquisa foi aprovado pelo DNIT no ano de 2022 e subsidiou, através do Edital RDC Eletrônico n.º 484/2022-00 (DNIT, 2022a), a contratação de empresa para a execução das obras de adequação de capacidade, duplicação, restauração, melhorias de segurança e eliminação de pontos críticos na BR-080/DF. As características predominantes desse projeto estão listadas a seguir.

- a) Nível de detalhamento do projeto: executivo;
- b) Trecho/segmento: Entr. BR-251(A)/DF-001/240(A) (Brasília) – Entr. DF-180(B) (Div. DF/GO) – km 0,00 ao km 24,60;
- c) Classe de projeto da rodovia: I-A (pista dupla com controle parcial de acesso);
- d) Tipo de região: predominantemente plana com superelevação máxima de 10%;
- e) Velocidade diretriz: 80 km/h;
- f) Seção transversal tipo: duas pistas de rolamento independentes, cada uma com 2 faixas com larguras individuais de 3,60 m, largura de acostamento externo de 3,0 m, largura de acostamento interno de 1,20 m e largura de canteiro central variável com média de 8,0 m; ciclovia paralela ao eixo da via e adjacente ao acostamento externo;
- g) Soluções de pavimentação: pistas de rolamento e acostamentos – implantação da pista nova com pavimento rígido de concreto e restauração da pista antiga usando a solução *whitetopping* (sobreposição de pavimento de concreto sobre o pavimento asfáltico antigo existente); e ciclovia – pavimento rígido de concreto;
- h) Vida útil de projeto dos pavimentos das pistas de rolamento: 20 anos, com o início da operação programado para o ano de 2025;
- i) Volume total de veículos comerciais ao longo da vida útil de projeto dos pavimentos: aproximadamente 17.000.000, sendo 18% ônibus e 82% caminhões;
- j) Obras de Arte Especiais (OAEs): alargamento de uma estrutura existente e construção de três novas;
- k) Tempo estimado de execução das obras: 12 meses, e
- l) Valor referencial de execução das obras: R\$ 318.861.401,69 (data-base: abril/2022), com o orçamento executado segundo a estrutura vigente do SICRO e para a região Centro-Oeste – Distrito Federal.

O mapa de localização e o diagrama linear com o detalhamento das soluções de pavimentação do projeto da BR-080/DF constam nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

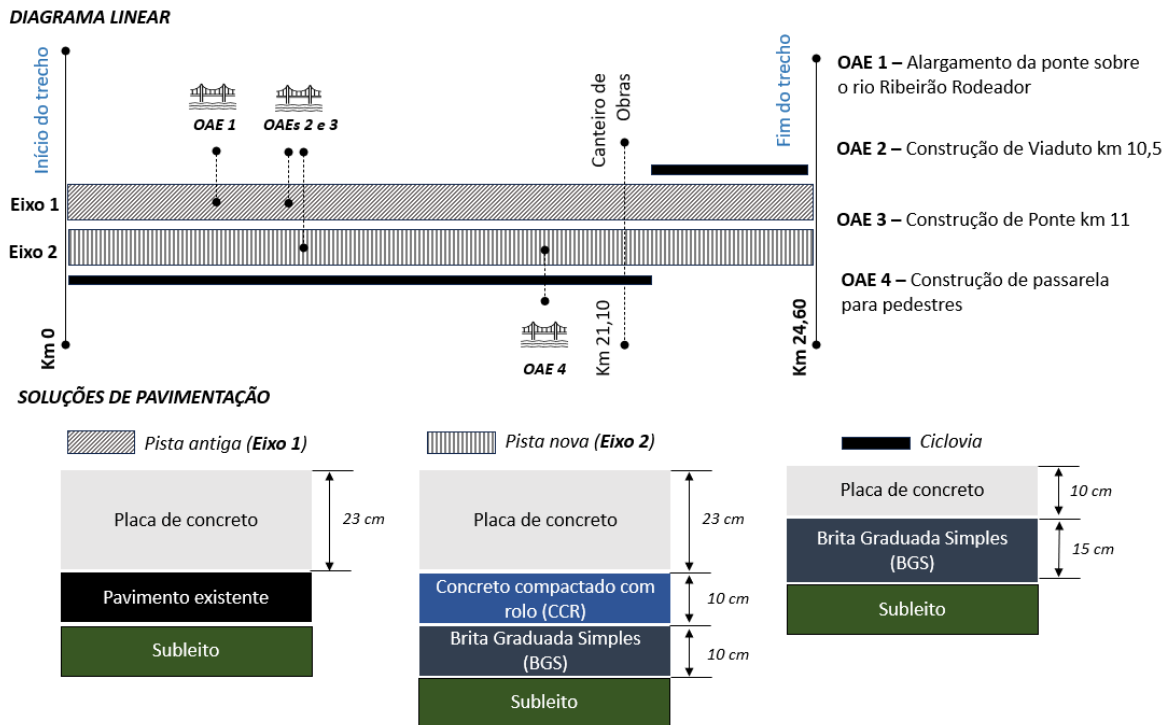
Figura 3.2 - Mapa de localização do projeto da BR-080/DF ¹



Nota ¹ DMTc – distância média de transporte entre o centro fornecedor e o canteiro de obras, DMTp - distância média de transporte entre o centro fornecedor e a pista/frente de serviço.

Fonte: Baseado no Edital RDC Eletrônico n° 484/2022-00 (DNIT, 2022a).

Figura 3.3 - Diagrama linear com as soluções de pavimentação do projeto da BR-080/DF



Fonte: Baseado no Edital RDC Eletrônico nº 484/2022-00 (DNIT, 2022a).

A Tabela 3.1 apresenta as distâncias média de transporte (DMTs) do projeto selecionado.

Tabela 3.1 – DMTs do projeto da BR-080/DF

Material	DMT _{pista} (km)	DMT _{canteiro} (km)
Agregado graúdo – fonte 1	31,13	22,34
Agregado graúdo – fonte 2	43,70	34,91
Areia	22,12	13,33
Aço – fonte 1	-	60,40
Aço – fonte 2	-	40,90
Cimento	-	65,60
Cal	-	63,60
Solo – fonte 1	9,52	-
Solo – fonte 2	19,97	-
Solo – fonte 3	44,03	-
Solo – fonte 4	61,56	-
RR-1C	-	779,01
CAP 30/45	-	225,01
Defensa metálica	-	1.065,00
Outros materiais ¹	9,29	29,30

Nota ¹ Incluídos todos os materiais secundários necessários à execução das obras, não listados anteriormente e cuja demanda é atendida pelo comércio local do Distrito Federal.

Fonte: Edital RDC Eletrônico nº 484/2022-00.

As localizações de origem dos materiais listados na Tabela 3.1 estão indicadas no mapa ilustrado na Figura 3.2, exceto as jazidas de solo e outros materiais. Observa-se que uma parte desses materiais é destinada à aplicação direta na pista ou em frentes de serviço, enquanto outra parte é encaminhada ao canteiro de obras e utilizada como matéria-prima para a produção de outros materiais, como o concreto. Assim como essa divisão e as regras de cálculo das DMTs informadas, os demais critérios adotados no projeto da BR-080/DF, como as especificações dos equipamentos e materiais, produtividades das equipes mecânicas, rotinas de execução e parâmetros de dimensionamento das soluções de engenharia, baseiam-se principalmente na metodologia da versão atual do SICRO (DNIT, 2024c) e nos requisitos normativos do IPR (DNIT, 2024d). Portanto, assume-se que o estudo de caso selecionado atende à necessidade de representar a prática atual em termos de dimensionamento de projetos e construção das rodovias federais brasileiras.

O projeto da BR-080/DF está dividido em 6 grupos principais de disciplinas: terraplanagem; restauração do pavimento existente; construção do pavimento novo; OAE; drenagem e obras de arte correntes (OAC), e demais serviços. Essas disciplinas apresentam variações em termos de materiais, equipamentos e quantitativos de serviços, o que permite avaliar a contribuição individual dessas disciplinas na carga ambiental total do projeto selecionado.

Em resumo, os critérios utilizados para selecionar o estudo de caso desta pesquisa foram os seguintes:

- a) Projeto rodoviário com solução em pavimento rígido de concreto de cimento *Portland*, elaborado com base nas premissas metodológicas da versão atual do SICRO e nos requisitos normativos do IPR;
- b) Projeto rodoviário aprovado com detalhamento executivo e com a disponibilização pública de todos os documentos técnicos, e
- c) Projeto rodoviário com grupos de disciplinas que apresentam variações em termos de materiais, equipamentos e quantitativos de serviços a executar.

3.3 FASE 1 – DADOS DE ENGENHARIA

Na Fase 1 do Modelo de ACV, ocorre a organização do sistema do produto principal, a definição das interações entre os diversos subsistemas que o compõem e a obtenção dos dados de engenharia provenientes do orçamento do projeto selecionado e dos relatórios técnicos do SICRO. Nesta metodologia, cada grupo de disciplina é considerado um subsistema do produto principal representado pelo projeto da BR-080/DF em sua totalidade. Esta primeira fase está subdividida nas seguintes rotinas:

- a) F1.a – Seleção do projeto de engenharia;
- b) F1.b – Organização das disciplinas de projeto em grupos;
- c) F1.c – Extração e tratamento dos dados do orçamento;
- d) F1.d – Fontes de energia e parâmetros de desempenho dos equipamentos;
- e) F1.e – Divisão dos dados de engenharia em fases de ACV.

3.3.1 F1.a – Seleção do projeto de engenharia

A primeira das rotinas listadas anteriormente foi realizada com base nos critérios apresentados na seção 3.2. Em seguida, são apresentados os detalhes correspondentes às outras rotinas da primeira fase do Modelo de ACV.

3.3.2 F1.b – Organização das disciplinas de projeto em grupos

Como mencionado anteriormente, o projeto da BR-080/DF está dividido em 6 grupos principais de disciplinas. Dessa forma, o Modelo de ACV adota a seguinte organização:

- a) Projeto integral: reúne todos os grupos de disciplinas e representa o sistema de produto principal do projeto selecionado, ou seja, a execução de todos os serviços e a entrega de todos os ativos de infraestrutura previstos no projeto;
- b) Terraplanagem: inclui serviços preliminares de desmatamento, destocamento e limpeza de áreas; escavação, carga e transporte de materiais de 1º categoria e de solos moles; compactação e regularização; além do tratamento de solos moles com geogrelhas apoiadas sob aterros estaqueados com perfis metálicos;
- c) Pavimento-restauração: abrange a restauração do pavimento antigo com a solução *whitetopping*;
- d) Pavimento-novo: contempla a pavimentação da nova pista e da ciclovia;

- e) OAE: prevê a construção de uma passarela para pedestres; o alargamento de uma estrutura existente e a construção de duas outras novas;
- f) Drenagem e OAC: incluem os serviços de drenagem superficial, profunda e subsuperficial da plataforma principal (pistas de rolamento e acostamentos) e da ciclovia, e
- g) Demais serviços: englobam sinalizações vertical, horizontal e de obras; obras complementares como cercas, dispositivos de segurança viária, execução de paradas de ônibus, além de serviços ambientais e de paisagismos.

3.3.3 F1.c – Extração e tratamento dos dados do orçamento

Dado que o projeto selecionado seguiu as metodologias da versão atual do SICRO e os requisitos normativos do IPR para o seu desenvolvimento, o volume técnico de seu orçamento contém os seguintes produtos: quadros de produção das equipes mecânicas; quadros de composição de custos; quadros com as DMTs; quadros de quantidades (materiais, equipamentos e mão de obra), dentre outros. A organização desses produtos no orçamento é baseada na Instrução de Serviço IS –220 do IPR/DNIT (DNIT, 2006).

Dessa forma, para cada um dos grupos de disciplinas do projeto da BR-080/DF, é possível obter a relação de materiais e equipamentos necessários para a execução dos serviços por meio do volume técnico de orçamento. Os materiais do orçamento correspondem às matérias-primas empregadas na confecção de produtos, como o concreto de cimento *Portland* produzido em central e posteriormente destinado à execução dos serviços de pavimentação e OAEs, ou aplicadas diretamente em um serviço de campo após a sua aquisição, a exemplo das britas comerciais utilizadas na construção de colchões drenantes. Já os equipamentos do orçamento englobam conjuntos de máquinas industriais, veículos, instrumentos ou quaisquer aparelhos utilizados na execução direta dos serviços (ou seja, relativos às atividades de campo) ou indireta dos serviços (como as instalações industriais para a confecção de produtos e as demais unidades de apoio do canteiro de obras).

Todos os materiais e equipamentos do orçamento do projeto da BR-080/DF estão individualmente referenciados pelo sistema de codificação do SICRO, ou seja, cada insumo do projeto possui uma sequência de caracteres que o identifica. Esse sistema de codificação é utilizado nesta metodologia como uma chave de comunicação entre as bases de dados (de engenharia e ambientais) e para viabilizar as rotinas de cálculo do Modelo de ACV, como será demonstrado adiante.

As unidades de medida dos insumos do projeto seguem as convenções estabelecidas no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes do SICRO/DNIT (DNIT, 2017). Isso implica em variações nas unidades de medida dos materiais, enquanto para os equipamentos é utilizada uma unidade padrão representada pela carga horária operativa e improdutiva de cada equipamento. Dessa forma, quando necessário, a unidade de medida de cada material (como o caso da brita, quantificada no projeto em metros cúbicos) foi ajustada para compatibilizá-la com a unidade de referência do dado ambiental correspondente (que para a brita é expressa em kg CO₂ eq. por tonelada de material produzido), garantindo assim que as saídas do Modelo de ACV fossem expressas em t CO₂ eq. ou t CO₂ eq. por unidade funcional. As conversões de unidade representam o tratamento dos dados do orçamento e foram realizadas com base nas massas específicas contidas no mencionado manual do SICRO/DNIT. Para os equipamentos, considerou-se apenas o horário total operativo, ou seja, quando o equipamento se encontra com o motor ligado executando uma determinada tarefa.

3.3.4 F1.d – Fontes de energia e parâmetros de desempenho dos equipamentos

Foram identificados os tipos de fontes de energia (óleo diesel, gasolina ou eletricidade) e os parâmetros de desempenho operacional, incluindo o consumo (L/kW h) e a potência nominal (kW), de todos os equipamentos listados no projeto de engenharia. Essas informações foram obtidas no Caderno técnico de parâmetros de equipamentos do SICRO (DNIT, 2023) e no Relatório de parâmetros dos equipamentos do SICRO (DNIT, 2022b).

3.3.5 F1.e – Divisão dos dados de engenharia em fases de ACV

O Modelo de ACV considera três fases do ciclo de vida de uma rodovia, denominadas Material, Transporte e Obra, conforme consta no fluxograma da Figura 3.1. A seguir, são apresentadas as descrições associadas a cada uma dessas fases:

- a) Material: interpretada conforme a definição dada pela ISO/TS 14048 (2020) como do “berço ao portão” (*creadle-to-gate*), esta fase engloba todas as operações necessárias para a produção dos materiais utilizados na execução dos serviços do projeto, desde a extração da matéria-prima da natureza até o seu processamento final nas instalações industriais do canteiro de obras ou do centro comercial produtor/fornecedor. Todos os materiais listados no projeto, incluindo os equipamentos utilizados em sua produção, estão classificados nesta fase. A inclusão

dos equipamentos nesta fase visa avaliar as emissões de CO₂ eq. associadas às suas operações durante o processamento dos materiais;

- b) Transporte: abrange todas as operações de transporte necessárias para a execução do projeto, desde a mobilização de equipamentos, como veículos e instalações industriais, até o transporte de materiais dos centros fornecedores para o canteiro de obras ou frentes de serviço, além do destino dos resíduos de obras para bota-foras, e
- c) Obra: compreende todas as operações realizadas pelos equipamentos que atuam diretamente no campo, incluindo máquinas utilizadas nos serviços de terraplanagem, como motoniveladoras, escavadeiras e rolos compactadores, e na pavimentação, como texturizadora e vibroacabadora.

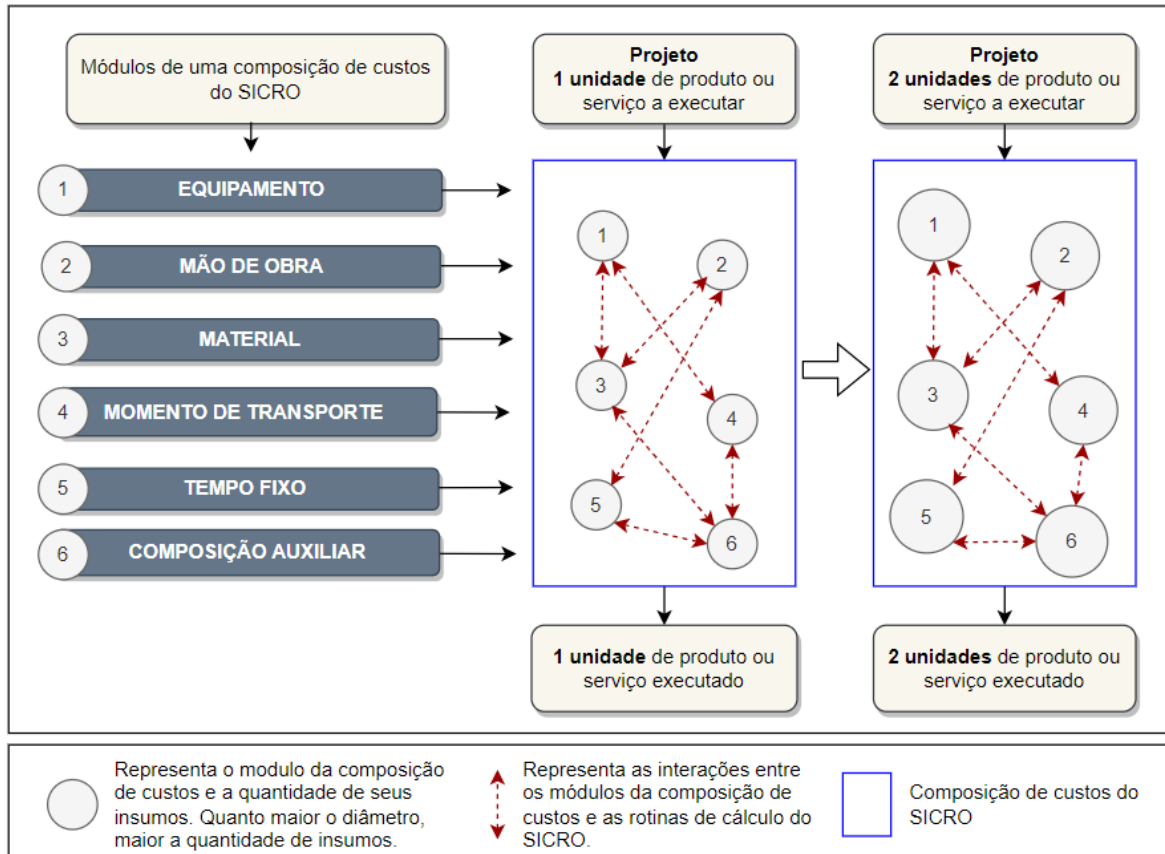
O Modelo de ACV não abrange as fases subsequentes à conclusão das obras planejadas no projeto da BR-080/DF, como as etapas de manutenção e operação da rodovia. Ademais, não contempla as emissões adicionais de CO₂ eq. resultantes da diminuição da velocidade do tráfego local, afetado momentaneamente pela fase de construção das obras, nem as emissões associadas à fabricação dos equipamentos listados no projeto e dos produtos utilizados em suas manutenções.

O próximo passo da metodologia envolve a classificação dos dados de engenharia nas três fases de ACV descritas anteriormente. No entanto, antes disso, foram analisados os principais aspectos da metodologia do SICRO para compreender a sua estrutura de organização e funcionamento.

Conforme consta no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes do SICRO/DNIT (DNIT, 2017), a base metodológica do SICRO está fundamentada no conceito de composições de custos, que consistem na modelagem da execução de determinado serviço, objetivando identificar informações de seu processo com a finalidade de precificá-lo. Essas composições reúnem diversas informações que se relacionam e estão divididas em determinados módulos, tais como: regras de execução do serviço, especificação dos insumos, consumos dos materiais, taxas de utilização de mão de obra e equipamentos, atividades auxiliares, tempos fixos relacionados às operações de carga, descarga e manobras de um equipamento, e momentos de transporte de insumos. Em relação a estes dois últimos módulos (tempos fixos e momentos de transporte), o que importa saber para esta pesquisa é que os seus resultados expressam a quantidade de horas produtivas e improdutivas dos

equipamentos utilizados no transporte dos insumos contidos na composição de custos. A Figura 3.4 demonstra a organização básica das composições de custos do SICRO.

Figura 3.4 - Estrutura básica de uma composição de custos do SICRO



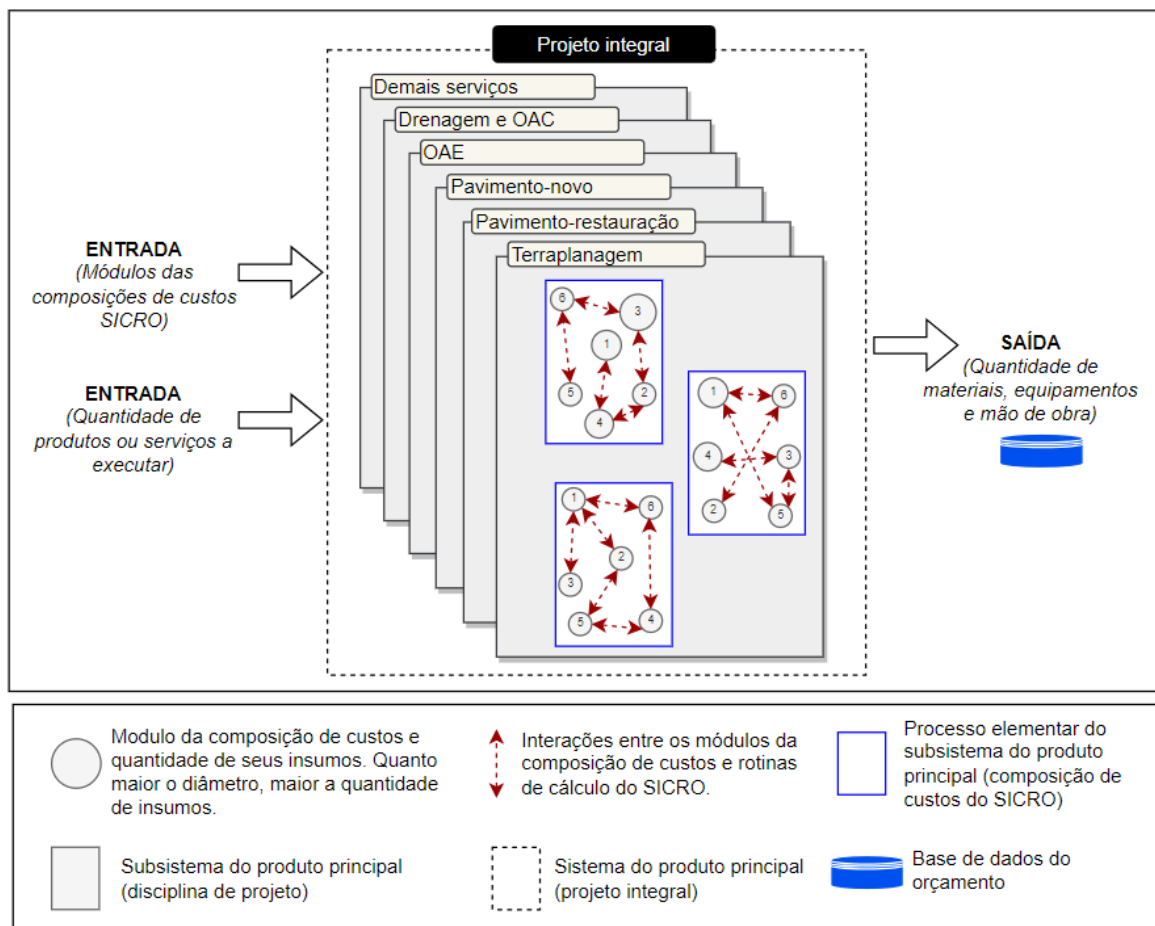
Fonte: Autor.

Pode-se notar na Figura 3.4 que as composições de custos do SICRO possuem dois tipos de entrada. Uma primeira relacionada aos seus próprios módulos (representados pelos círculos de 1 a 6), sendo que cada módulo possui uma determinada quantidade de insumos, e uma segunda entrada representa pelos produtos ou serviços a executar que advém do projeto de engenharia. Por padrão, as composições de custos do SICRO são dimensionadas para a execução unitária de um determinado produto ou serviço. Nessa composição unitária, são estabelecidas todas as interações entre os módulos e definidas as regras de cálculo para a execução da unidade do produto ou serviço previsto no projeto. Essas interações e regras são fixadas e padronizadas para cada tipo de composição, o que significa que, independentemente da quantidade de produto ou serviço especificado no projeto, as regras de cálculo e os relacionamentos permanecem inalterados na composição. Isso é evidenciado na Figura 3.4, onde a execução de uma ou duas unidades de um determinado produto ou serviço não altera o número de setas tracejadas, nem a ordem de conexão delas com os

módulos da composição de custos. Observa-se ainda que, à medida que a quantidade de um determinado produto ou serviço aumenta, os quantitativos dos insumos contidos em cada um dos módulos da composição de custos também aumentam (comportamento representado pelo aumento do diâmetro dos círculos de 1 a 6).

Dessa forma, a estrutura de organização e funcionamento da metodologia do SICRO foi empregada para o desenvolvimento do inventário do Modelo de ACV. A composição de custos é interpretada nesta metodologia como um processo elementar ou unitário, e a reunião das várias composições de custos que integram cada um dos grupos das disciplinas de projeto como um subsistema do produto principal, representado pelo projeto integral. A Figura 3.5 detalha essa lógica de organização.

Figura 3.5 – Estrutura básica do inventário do Modelo de ACV



Fonte: Autor.

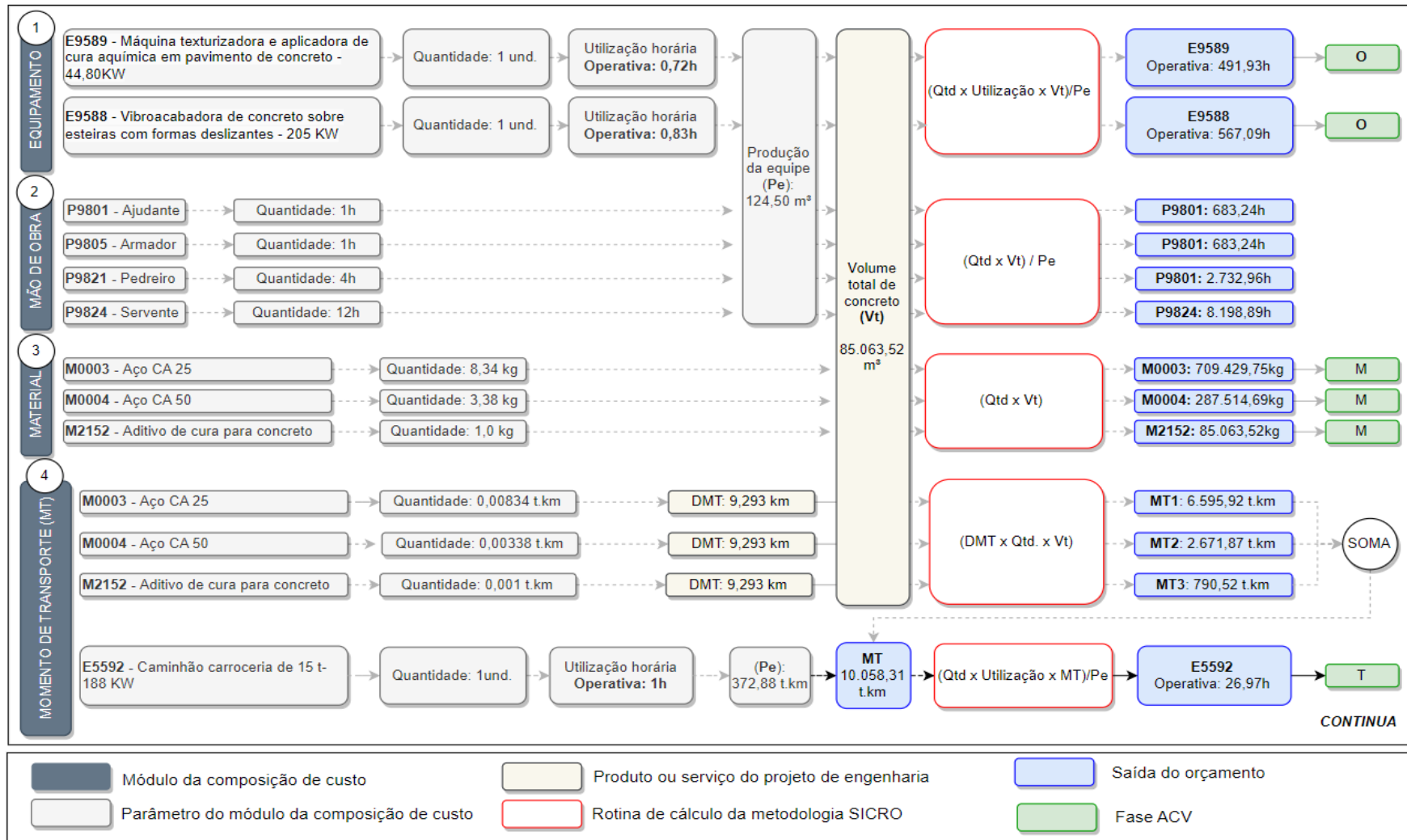
Com a estrutura do inventário do Modelo de ACV definida, iniciou-se a classificação dos dados do orçamento do projeto nas fases de Material (M), Transporte (T) e Obra (O). Esse processo foi conduzido no Microsoft Excel com o suporte de uma programação desenvolvida

em *Visual Basic for Application* (VBA). Como parte da rotina de análise, foram examinadas individualmente as composições de custos presentes em cada um dos seis grupos de disciplinas de projeto. Esse procedimento permitiu identificar os insumos contidos em cada módulo das composições de custos, assim como compreender a qual processo esses insumos estavam associados, ou seja, se estavam relacionados às atividades produção de materiais, transporte ou execução de obras. Após a realização do procedimento de classificação dos dados pertencentes aos grupos de disciplinas, chegou-se à classificação final do projeto integral, decorrente da consolidação das classificações dos grupos de disciplinas em uma base comum de dados.

A Figura 3.6 apresenta uma análise do processo de classificação dos dados orçamentários do projeto da BR-080/DF nas fases do Modelo de ACV, utilizando como exemplo a composição SICRO 4011533 — *Pavimento de concreto com formas deslizantes — areia e brita comerciais*, que faz parte do grupo de disciplina Pavimento-novo. Na Figura 3.6, é possível notar que os insumos estão organizados segundo a composição principal (módulos de 1 a 5) e a composição auxiliar (módulo 6), na qual estão incluídos os insumos para a produção do concreto utilizado na pavimentação.

É importante salientar que a metodologia do SICRO apresenta um nível de detalhamento e abrangência superior ao apresentado nesta pesquisa, embora os conceitos discutidos sejam limitados ao que é necessário para compreender as premissas assumidas na elaboração da primeira fase do Modelo de ACV. Mais detalhes sobre o sistema em questão podem ser encontrados no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes do SICRO/DNIT (DNIT, 2017).

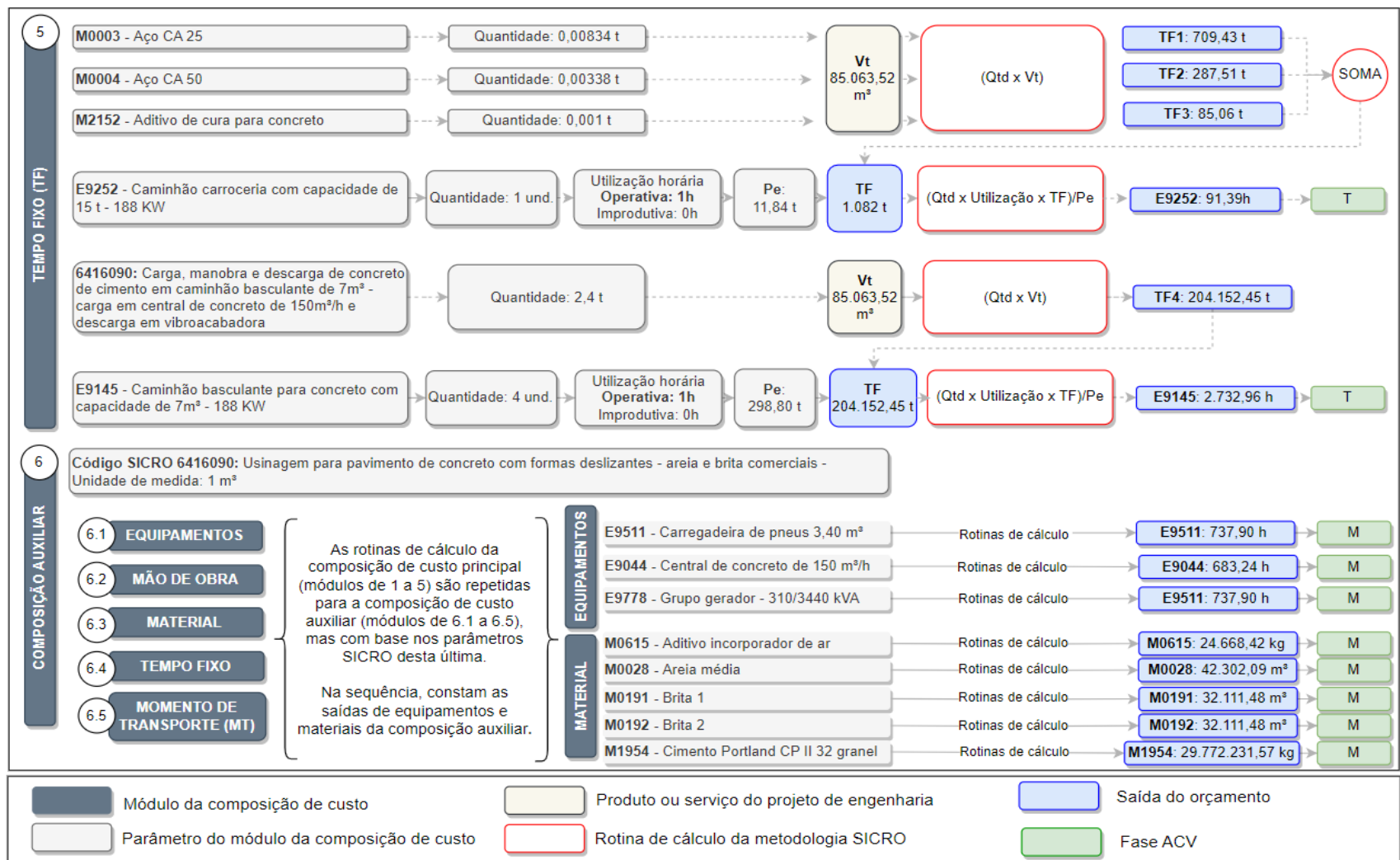
Figura 3.6 – Exemplo demonstrativo do processo de classificação dos dados orçamentários em fases ACV: composição SICRO 4011533 — Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes — areia e brita comerciais



Fonte: Adaptado do Edital RDC Eletrônico n.º 484/2022-00 (DNIT, 2022a).

Continua

Figura 3.6 – Exemplo demonstrativo do processo de classificação dos dados orçamentários em fases ACV: composição SICRO 4011533 — Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes — areia e brita comerciais



Fonte: Adaptado do Edital RDC Eletrônico n.º 484/2022-00 (DNIT, 2022a).

3.4 FASE 2 – DADOS AMBIENTAIS

A Fase 2 da metodologia está subdividida nas seguintes rotinas:

- a) F2.a – Seleção das fontes de dados ambientais, e
- b) F2.b – Avaliação da qualidade e quantificação da incerteza dos dados ambientais.

As rotinas descritas acima estão listadas em ordem cronológica de execução, com os seus correspondentes detalhes apresentados a seguir.

3.4.1 F2.a – Seleção das fontes de dados ambientais

Nesta etapa da metodologia, adicionam-se ao inventário do Modelo de ACV informações sobre os fatores de emissão (kg CO₂ eq./und. funcional) referentes ao processo de produção dos materiais, à geração de energia elétrica pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) e à queima de combustíveis durante as atividades de operação dos equipamentos.

Para os materiais, optou-se por selecionar referências de acesso público e cuja declaração ambiental tenha adotado as recomendações estipuladas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 (2014) e ABNT NBR ISO 14044 (2014), ou suas versões equivalentes publicadas pela ISO. Em complemento, foram priorizadas na seleção aquelas declarações ambientais que também seguiram as diretrizes das normas ISO 14025 (2006), ISO 21930 (2017), EN 15804+A1 (2013) e EN 15804+A2 (2019). No que diz respeito ao conteúdo dessas declarações, foram avaliados os seguintes elementos básicos:

- a) Escopo geográfico: local de produção do material;
- b) Sistema considerado: extração de matéria-prima, transportes até a fábrica e produção;
- c) Tipo de dado utilizado no inventário e método de aquisição: específico do processo produtivo analisado ou genérico proveniente de parâmetros médios regionais ou nacionais;
- d) Critérios de corte assumidos e margem de variação dos dados do inventário;
- e) Representatividade temporal dos dados do inventário;
- f) Modelo de caracterização adotado para a categoria de impacto Mudança Climática;
- g) Fator de emissão do material (FEM) (em kg CO₂ eq./und. de referência do material): valor e unidade associada, e
- h) Outros elementos que permitam estimar a qualidade do FEM com base nos indicadores da Matriz Pedigree (seção 2.3.3 – Tabela 2.9), tais como: métodos usados

para verificação dos dados, nível tecnológico para os quais os dados são representativos e se a declaração foi validada por uma fonte independente.

O fator de emissão relacionado à geração de energia elétrica pelo SIN (FEE) foi estimado com base em dados divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). A Tabela 3.2 apresenta os detalhes do FEE adotado no Modelo de ACV.

Tabela 3.2 – FEE do Modelo de ACV

Fator	Unidade	Valor	Observação	Referência
FEE	Kg CO ₂ eq./kW h	0,035	O valor adotado representa a média relativa ao período de jan./2023 – jul./2023. ¹ Os valores divulgados pela EPE consideram apenas a contribuição dos seguintes GEE: CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O.	Base de dados consultada: EPE (2023a). Detalhamento da metodologia de cálculo: EPE (2022).

Nota ¹ Período com os dados mais recentes disponíveis no momento da consulta.

Fonte: Autor.

Já em relação aos fatores de emissão associados à queima de combustíveis durante as atividades de operação dos equipamentos (FEC), eles foram estimados com base nas referências e rotinas de cálculo apresentadas a seguir:

- a) Quantificação dos fatores de emissão relacionados à queima dos combustíveis puros contidos na matriz energética nacional, levando-se em conta os GEE mais relevantes para o setor de energia (IPCC, 2006b) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Fatores de emissão relativos à queima dos combustíveis puros nacionais

Combustível	Unidade	Fatores de emissão (kg GEE/unidade)		
		CO ₂ ¹	CH ₄ ²	N ₂ O ²
Gasolina automotiva (pura)	litros	2,212	0,00081	0,00026
Óleo diesel (puro)	litros	2,603	0,00014	0,00014
Biodiesel (B100)	litros	2,431	0,00060	-
Etanol Anidro	litros	1,526	0,00040	-

(1) Referência: CETESB (2022) – Apêndice Z, pg. 203

(2) Referência: IPCC (2006b) - *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* – Volume 2, Capítulo 3. Adotados os fatores *default* da Tabela 3.2.2 (pg. 21), com a conversão da unidade original de kg/TJ para kg/L com base nos valores de poder calorífico inferior e massas específicas dos combustíveis, presentes no Relatório do Balanço Energético Nacional 2023: (EPE, 2023a) — Tabela VIII.9 (pg. 229). Memória de cálculo contida na seção de Apêndices.

Fonte: Autor.

- b) Obtenção do valor médio da mistura de etanol anidro na gasolina pura e de biodiesel (B100) no óleo diesel puro durante o período de jan./2023 a jul./2023 (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Misturas dos combustíveis comercializados no Brasil

Parâmetros (ano base: 2023) ¹	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Média
etanol anidro na gasolina (pura)	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
biodiesel (B100) no diesel (puro)	10%	10%	10%	12%	12%	12%	12%	11,5%

Nota ¹ Período com os dados mais recentes disponíveis no momento da consulta.

Fonte: EPE (2023a).

- c) Cálculo dos FECs da gasolina e óleo diesel comercializados no Brasil, considerando os valores médios de mistura praticados no período de jan./2023 a jul./2023 (Tabela 3.4), os GEE mais relevantes para o setor de energia com seus respectivos fatores de caracterização (CO₂, CH₄ e N₂O - 1, 25 e 298, respectivamente) (IPCC, 2013), e os fatores de emissão da queima dos combustíveis puros nacionais (Tabela 3.3). Os valores obtidos e adotados no Modelo de ACV estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – FECs do Modelo de ACV ¹

Fator de emissão	Combustível	Valor (kg CO₂ eq./L)
FEC _{gasolina-m}	Gasolina (mistura)	2,096
FEC _{diesel-m}	Óleo diesel (mistura)	2,621

Nota ¹ Memória de cálculo contida na seção de Apêndices.

Fonte: Autor.

Deve-se observar que os FECs estimados nesta pesquisa utilizam parâmetros de emissão de equipamentos móveis como base de cálculo (CETESB, 2022; IPCC, 2006b). Logo, devido à ausência de uma referência nacional que permita estimar esse fator de emissão para os equipamentos estacionários do SICRO, os valores da Tabela 3.5 foram utilizados no Modelo de ACV sem fazer distinção entre equipamentos móveis e estacionários que usam combustível como fonte de energia.

Quanto à organização dos dados do inventário no Modelo de ACV, os dois últimos apresentados (FEE e FEC) foram incluídos no sistema de segundo plano (*background*), uma vez que as suas estimativas são baseadas em parâmetros que variam ao longo do tempo e não estão sob o controle dos processos do projeto em estudo. Os outros dados do inventário

(FEM e dados de engenharia), por serem específicos ou representarem satisfatoriamente os processos relacionados ao projeto selecionado, foram adicionados ao sistema de primeiro plano (*foreground*), conforme indicado no fluxograma da Figura 3.1.

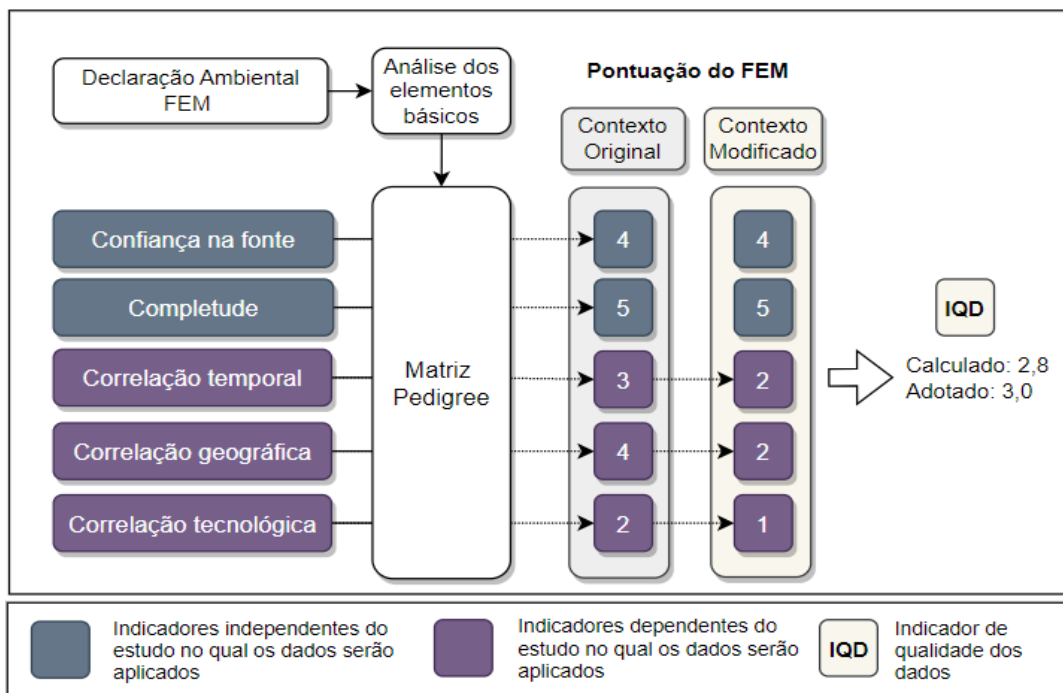
3.4.2 F2.b – Avaliação da qualidade e quantificação da incerteza dos dados ambientais

Esta etapa da metodologia é uma atividade que subsidia a seleção de dados ambientais de melhor qualidade para os materiais (FEM), reduzindo assim a influência das incertezas associadas a esses elementos do inventário nos resultados probabilísticos do Modelo de ACV. Esta etapa segue a abordagem adotada por Canter *et al.* (2002) e Hong *et al.* (2016) e está subdividida em três partes: a avaliação qualitativa dos FEMs, a quantificação das incertezas dos FEMs, e a associação entre a carga ambiental do material e a incerteza de seu FEM.

F2.b.1 – Avaliação qualitativa dos FEMs

A avaliação da qualidade dos dados ambientais dos materiais foi realizada conforme o Método IQDs, proposto Weidema e Wesnaes (1996), e cujos detalhes constam na seção 2.3.3. A Figura 3.7 apresenta as etapas do processo de avaliação da qualidade dos FEMs desta pesquisa.

Figura 3.7 – Etapas do processo de avaliação da qualidade dos FEMs



Fonte: Baseado em Canter *et al.* (2002) e Hong *et al.* (2016).

Na Figura 3.7, observa-se que o processo de avaliação da qualidade dos FEMs está dividido em duas etapas principais. A primeira etapa tem como objetivo identificar as características dos elementos básicos da declaração ambiental (listados no início da seção 3.4.1) dentro do contexto original em que ela foi desenvolvida. Por exemplo, os dados do inventário de uma declaração ambiental considerados na época de seu desenvolvimento possuíam uma idade média de 9 anos, contados a partir do ano de medição ou levantamento. Assim, no contexto original de desenvolvimento da declaração, a nota do indicador de *correlação temporal* seria atribuída como 3 de acordo com a Matriz Pedigree (Tabela 2.9). Na segunda etapa do processo de avaliação, são consideradas as especificidades do estudo no qual a declaração ambiental será utilizada. Continuando com o exemplo anterior, se a mesma declaração ambiental for aplicada após alguns anos como dado de entrada em um modelo de ACV, onde a diferença entre o ano de uso e o ano de medição dos dados do inventário passe a ser de 14 anos, a pontuação do indicador de *correlação temporal* seria 2, mas agora em um contexto diferente do original, ou seja, no contexto modificado.

A mesma lógica descrita anteriormente foi aplicada nesta pesquisa para os outros dois indicadores dependentes da Matriz Pedigree: *correlação geográfica* e *correlação tecnológica*. Quanto aos indicadores independentes, seguindo a definição do Método IQDs, não foram realizadas distinções entre as pontuações do contexto original e modificado, conforme exemplificado na Figura 3.7.

Por último, como elemento de entrada da próxima etapa da metodologia, foi calculado o valor do IQD, que representa a média aritmética simples das pontuações finais (ou seja, considerando o contexto modificado) atribuídas aos indicadores da Matriz Pedigree para cada FEM coletado.

F2.b.2 – Quantificação das incertezas dos FEMs

As incertezas dos FEMs desta pesquisa foram quantificadas com o emprego do MMC e o uso do valor do IQD para realizar a parametrização da FDP do tipo beta, conforme apresentado na seção 2.3.4. Contudo, para uma melhor compreensão dos procedimentos adotados nesta etapa da metodologia, é reapresentada a seguir a tabela com as relações entre os parâmetros da função beta e os valores possíveis do IQD.

Tabela 3.6 - Parâmetros da FDP do tipo beta com base no IQD ¹

IQD	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
(α, β)	(5,5)	(4,4)	(3,3)	(2,2)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)
Intervalo									
(a, b)²	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Z (+/-)									

Nota ¹ O valor do IQD é definido a partir da média aritmética simples das pontuações atribuídas aos 5 indicadores da Matriz Pedigree. Nota ² Os pontos finais do intervalo são obtidos com base nas seguintes expressões: $a = (1 - Z) \times (FEM)$ e $b = (1 + Z) \times (FEM)$.

Fonte: Adaptado de Canter *et al.* (2002).

Observa-se na Tabela 3.6 que o FEM foi definido como o valor médio da curva da FDP beta, com os valores extremos do intervalo representados por "a" e "b" variando em função dos valores do IQD. Esses elementos, juntamente com os parâmetros de forma da curva (α, β), que também variam em função do IQD, são suficientes para caracterizar as FDPs de entrada das simulações do MMC.

Com as FDPs beta definidas, a próxima etapa foi realizar simulações do MMC para determinar o CoV associado ao dado ambiental de cada material, ou seja, cada FEM coletado teve a sua FDP beta submetida a uma simulação e o CoV correspondente foi determinado. As simulações foram conduzidas no *software* Crystal Ball devido à sua disponibilidade de acesso e compatibilidade com o Microsoft Excel. Foi estabelecido um IC de 95% e realizadas 10.000 iterações por simulação, quantidade previamente identificada como suficiente em estudos anteriores (Wang; Shen, 2013; Yu; Wang; Gu, 2018). O CoV deve ser interpretado nesta pesquisa como um indicador para a determinação das incertezas envolvidas no Modelo de ACV, conforme a definição apresentada na seção 2.3.4.4.

F2.b.3 – Associação entre a carga ambiental do material e a incerteza de seu FEM

Seguindo as etapas da metodologia adotada por Canter *et al.* (2002) e Hong *et al.* (2016), o próximo passo foi realizar a associação entre a carga ambiental (em t CO₂ eq.) de cada material do projeto e o seu correspondente CoV. A carga ambiental do material foi calculada através da multiplicação do seu FEM pelo seu quantitativo no projeto integral.

Os resultados da presente etapa indicam conjuntos de materiais críticos e não críticos em termos de impacto ambiental e contribuição para as incertezas do Modelo de ACV. Segundo Canter *et al.* (2002), trata-se de uma etapa iterativa na qual a atenção deve ser focada para reduzir a incerteza dos elementos de entrada mais relevantes para os modelos de ACV.

No âmbito desta pesquisa, inicialmente adotou-se o inventário desenvolvido por Stripple (2001) como uma primeira estimativa dos FEMs, usados para calcular a carga ambiental potencial dos materiais do projeto selecionado. Em seguida, estabeleceu-se uma ordem de classificação dos materiais com base em suas contribuições ambientais individuais, priorizando para o Modelo de ACV aqueles que representaram 95% ou mais da emissão total dos materiais. Com os materiais prioritários definidos, iniciou-se a busca por declarações ambientais mais recentes para cada um deles, a partir das quais foi realizada a avaliação qualitativa e a quantificação das incertezas de seus FEM, seguindo os procedimentos descritos anteriormente (seções F2.b.1 e F2.b.2). Ao final, selecionou-se para cada material a fonte de dado ambiental com o menor CoV associado.

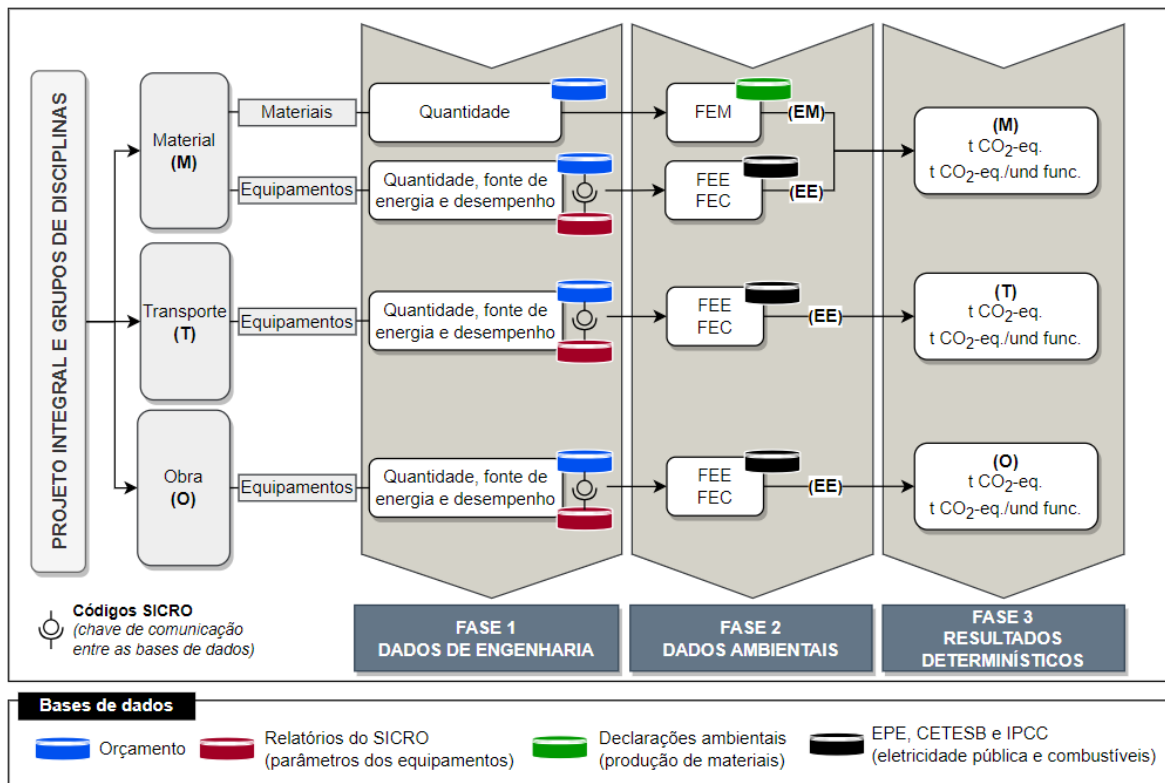
As incertezas relativas aos fatores de emissão dos combustíveis nacionais (FECs) e da geração de energia elétrica pelo SIN (FEE) não foram quantificadas por meio da aplicação conjunta do Método IQDs e MMC, devido à falta de informações mais detalhadas sobre os seus sistemas e elementos básicos de seus inventários. No entanto, o *Guidelines* para os inventários nacionais de gases de efeito estufa do IPCC (IPCC, 2006b) indica que os fatores de emissão dos combustíveis têm uma incerteza associada de 2% a 5% para o setor de transporte terrestre, devido principalmente à imprecisão sobre a verdadeira composição dos combustíveis comerciais. Esse relatório também sugere que essa faixa de incerteza pode ser reduzida utilizando parâmetros nacionais para estimar os fatores de emissão dos combustíveis, uma abordagem aplicada nesta metodologia. Dessa forma, considerou-se que os FECs desta pesquisa podem variar no intervalo delimitado por $\pm 5\%$ de seu valor de referência (Tabela 3.2). No que diz respeito ao FEE, foi considerado que ele pode assumir qualquer valor no intervalo de $\pm 30\%$ de seu valor de referência (Tabela 3.5), tomando como base os valores máximos e mínimos dos FEEs mensais de jan./2023 a jul./2023 (EPE, 2023b). Em ambos os casos, assume-se que a probabilidade de obter qualquer valor no intervalo especificado é constante, indicando assim uma distribuição de probabilidade do tipo uniforme para esses dois fatores de emissão.

Portanto, a presente etapa da metodologia deve ser interpretada como uma atividade intermediária que visa aprimorar a qualidade dos dados ambientais dos materiais do Modelo de ACV, mas sem a intenção de eliminar as suas incertezas por completo.

3.5 FASE 3 – RESULTADOS DETERMINÍSTICOS

A Fase 3 da metodologia compreende a obtenção dos resultados determinísticos do Modelo de ACV do projeto da BR-080/DF, ou seja, sem considerar a influência das incertezas dos dados ambientais nos resultados. O fluxograma da presente fase consta na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Fluxograma da Fase 3 do Modelo de ACV



Acrônimos: FEM – fator de emissão associado à produção do material; FEE – fator de emissão da geração de energia elétrica pelo SIN; FEC – fator de emissão da queima de combustíveis durante as atividades de operação dos equipamentos; EM – equação de emissão dos materiais; EE – equação de emissão dos equipamentos.

Fonte: Autor.

As expressões *EM* e *EE* da Figura 3.8 representam as equações utilizadas para obter os valores determinísticos de emissão, tanto em termos de emissão total (t CO₂ eq.) quanto unitária (t CO₂ eq./und funcional), relativos à produção dos materiais e à operação dos equipamentos do projeto, respectivamente. As formulações dessas equações são detalhadas a seguir.

$$EM = \sum_{i=1}^n FEM_i \times QM_i \times 10^{-3} \quad (3.1)$$

Onde FEM_i é o fator de emissão referente ao processo de produção de cada material (em kg CO₂ eq/ und. de referência do material) e QM_i é a quantidade do material presente no projeto integral e nos grupos de disciplinas (em unid. de referência do material).

$$EE = EE_{elet} + EE_{comb} \quad (3.2)$$

Sendo EE_{elet} e EE_{comb} os valores de emissão (em t CO₂ eq. ou t CO₂ eq./und. funcional) associados às atividades de operação dos equipamentos que funcionam com energia elétrica gerada pelo SIN e combustíveis comerciais nacionais (diesel ou gasolina), respectivamente. As formulações dessas duas expressões são apresentadas a seguir.

$$EE_{elet} = \sum_{i=1}^n QHe_i \times Pe_i \times FEE \times 10^{-3} \quad (3.3)$$

Onde QHe_i é a quantidade total de horas operacionais de cada equipamento que utiliza eletricidade como fonte de energia (em h), Pe_i a potência nominal do equipamento (em kW) e FEE o fator de emissão relacionado à geração de energia elétrica pelo SIN (em kg CO₂ eq./kW h, Tabela 3.4).

$$EE_{comb} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 QHc_i \times Pc_i \times CC_i \times FEC_j \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

Em que QHc_i é a quantidade total de horas operacionais de cada equipamento que utiliza combustível como fonte de energia (em h), Pc_i a potência nominal do equipamento (em kW), CC_i o consumo médio de combustível pelo equipamento (em L/kW h) e FEC_j o fator de emissão da queima de combustível durante as atividades de operação do equipamento (em kg CO₂ eq./L, Tabela 3.5).

Os resultados determinísticos do Modelo de ACV foram expressos em termos do projeto integral — representado de forma simplificada pelo diagrama unifiliar da Figura 3.3 — e individualmente para os 6 grupos de disciplinas definidos na primeira fase desta metodologia (seção 3.3.2), organizados segundo as fases Material, Transporte e Obra, e vinculados a duas unidades funcionais. A primeira unidade funcional é representada pela construção de uma rodovia federal brasileira classe I-A de 1 km de extensão em uma região plana, com uma velocidade diretriz de 80 km/h e apresentando uma pista duplicada (2 pistas de rolamento independentes, cada uma com 2 faixas, com larguras individuais de 3,60 m), com um volume

acumulado de veículos comerciais no 20º ano de 17.000.000. Essa unidade funcional foi aplicada aos resultados do projeto integral e aos grupos de disciplinas: terraplanagem, pavimento-restauração, pavimento-novo, drenagem e OAC, e demais serviços. A segunda unidade funcional refere-se à disciplina de OAE e consiste em 1 m² de tabuleiro de OAE construído em uma rodovia federal brasileira classe I-A. Optou-se pelo emprego dessas unidades funcionais para representar de forma mais adequada os resultados dos grupos de disciplinas e permitir a comparação com os resultados de outras pesquisas.

Os resultados em termos de emissão unitária (t CO₂ eq./unidade funcional) foram obtidos dividindo os valores de emissão total (t CO₂ eq) por 24,60 km (extensão linear total do projeto selecionado) para o projeto integral e aos grupos de disciplinas: terraplanagem, pavimento-restauração, pavimento-novo, drenagem e OAC, e demais serviços. Para a disciplina de OAE, a emissão unitária foi obtida dividindo o valor de emissão total correspondente por 2.018,18 m² (área total de tabuleiro a executar). A rotina de cálculo apresentada na Figura 3.8 foi aplicada individualmente aos três cenários de análise: BR, EUA e EUR.

3.6 FASE 4 – RESULTADOS PROBABILÍSTICOS

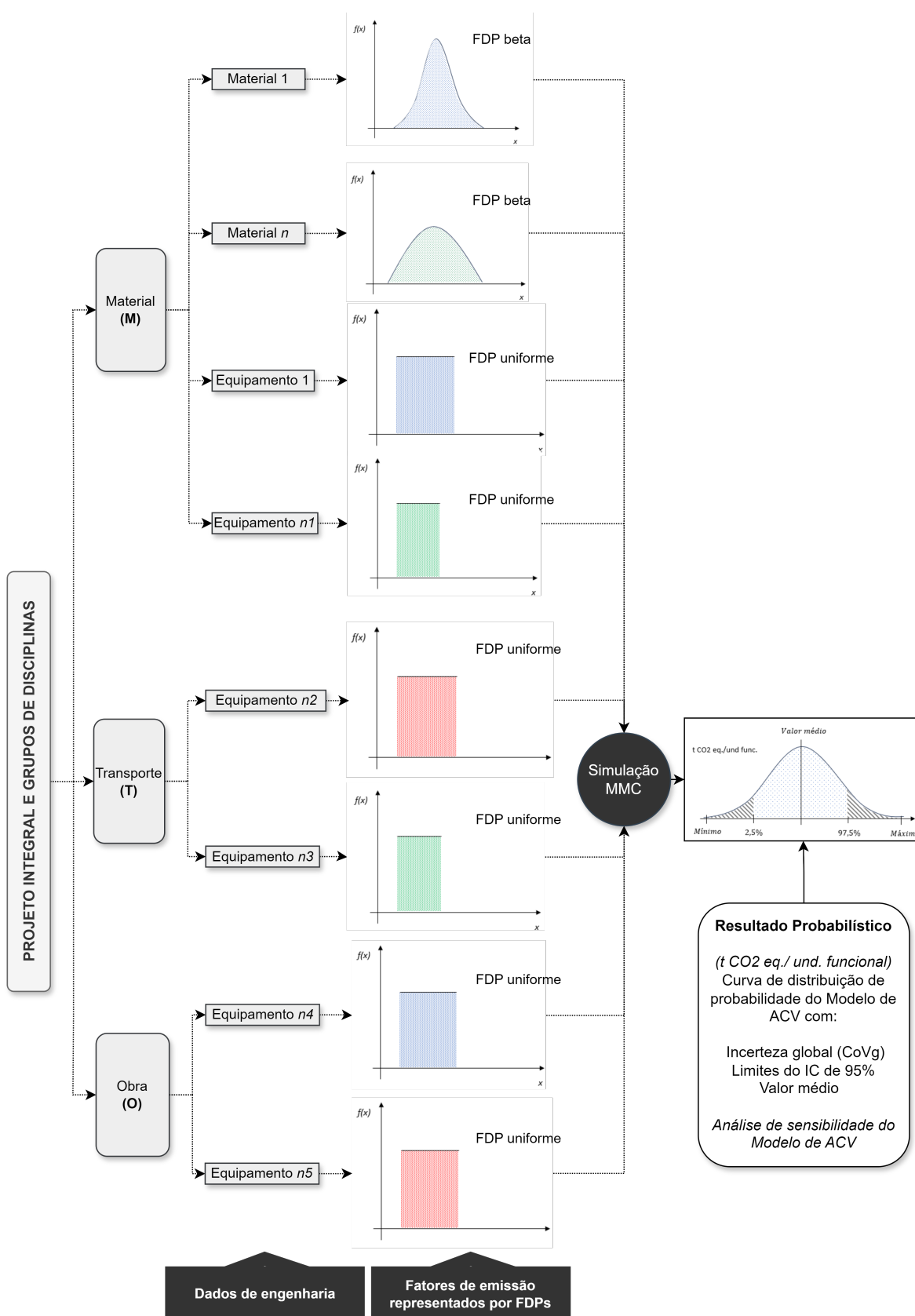
Na Fase 4, a última etapa da metodologia, os resultados probabilísticos do Modelo de ACV são obtidos por meio das simulações do MMC. O detalhamento das etapas desta fase está ilustrado na Figura 3.9.

Observa-se na Figura 3.9 que a diferença básica em relação à rotina de cálculo da Fase 3 consiste essencialmente na conversão dos fatores de emissão (FEM, FEE e FEC) em uma variável aleatória contínua com uma distribuição de probabilidade associada. Portanto, os equacionamentos detalhados na fase anterior foram mantidos na presente fase, porém o valor determinístico do dado ambiental foi convertido em uma FDP. Para o Modelo de ACV desta pesquisa, foram adotadas FDPs com as seguintes distribuições:

- a) Distribuição uniforme para os fatores FEE e FEC. O valor determinístico do fator foi adotado como o valor médio da FDP. Os valores extremos do intervalo dessas distribuições foram definidos da seguinte forma: para os FECs, considerou-se que os extremos são formados por $\pm 5\%$ de seu valor referencial (Tabela 3.2), enquanto para o FEE foram utilizados $\pm 30\%$ de seu valor referencial (Tabela 3.5).
- b) Distribuição beta para o fator FEM. O valor determinístico desse fator também foi adotado como o valor médio da FDP. Os parâmetros da função beta foram determinados a partir do cálculo do IQD associado ao FEM selecionado para cada material, adotando os relacionamentos contidos na Tabela 3.6.

Com os parâmetros das FDPs dos fatores de emissão definidos, realizou-se a associação destes com os dados de engenharia correspondentes, seguindo os equacionamentos já apresentados na Fase 3. Todos esses elementos foram reunidos e empregados como parâmetros de entrada da simulação do MMC, conduzida no *software* Crystal Ball. Os resultados probabilísticos do Modelo de ACV são expressos em termos de emissão unitária (t CO₂ eq./unidade funcional), com a indicação do valor médio e dos valores extremos para um IC de 95%, além do coeficiente de variação global do modelo (CoVg). Os resultados desta fase são apresentados individualmente para o projeto integral e os grupos de disciplinas. Nesta fase, optou-se por não dividir os resultados em fases de ACV, ou seja, os seus resultados são globais e representam o somatório dos valores correspondentes às emissões unitárias das três fases de ACV, como é demonstrado na Figura 3.9. A rotina de cálculo desta fase foi aplicada individualmente aos três cenários de análise estabelecidos nesta pesquisa: BR, EUA e EUR.

Figura 3.9 – Fluxograma da Fase 4 do Modelo de ACV



Fonte: Baseado em Canter *et al.* (2002) e Hong *et al.* (2016).

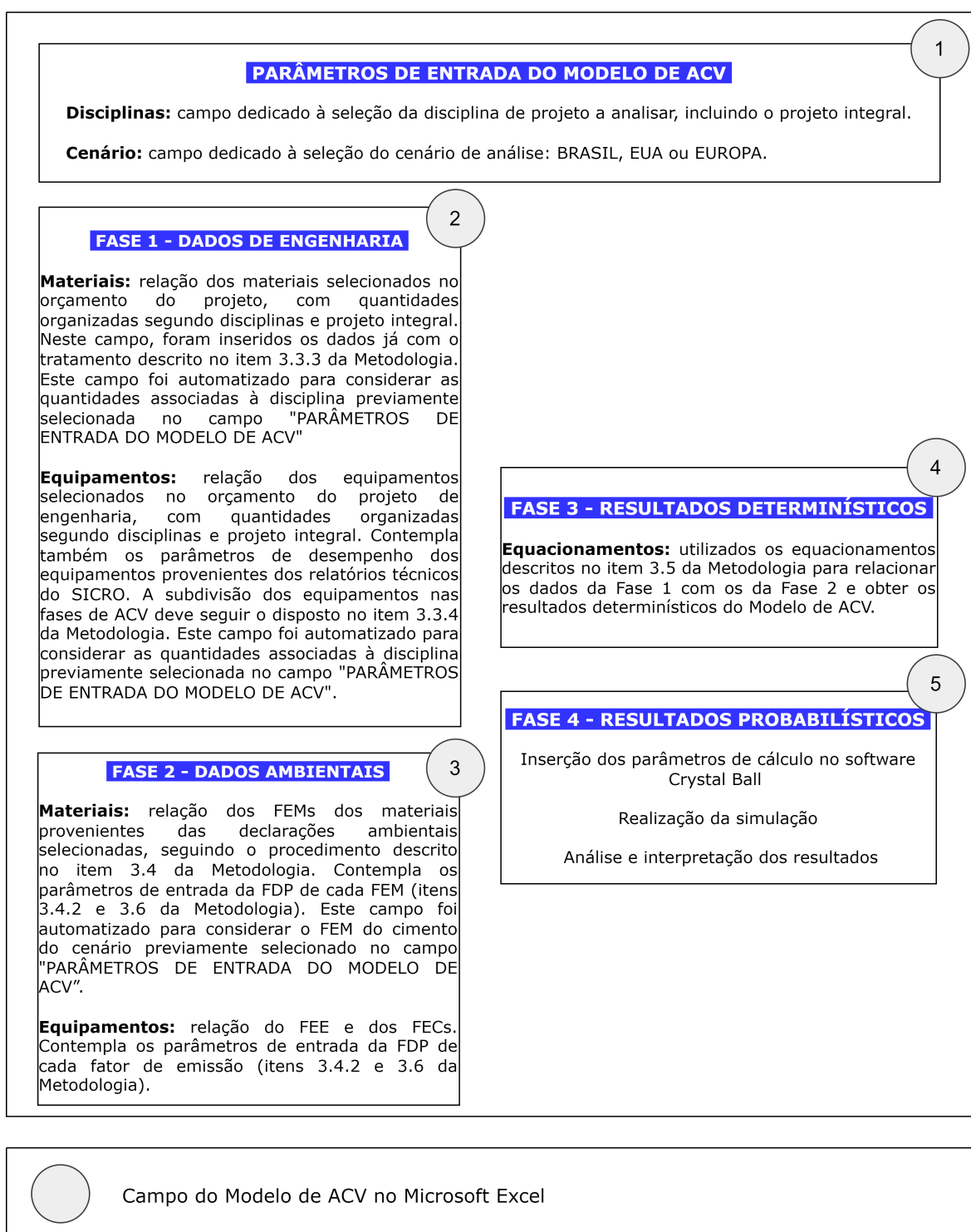
O resultado da Fase 4 também engloba a análise de sensibilidade do Modelo de ACV, que permite analisar o efeito de uma mudança em uma única entrada nos resultados de um estudo de ACV (Rosenbaum, 2012). No *software* Crystal Ball, essa análise é realizada considerando tanto as propriedades qualitativas (ou seja, as incertezas) quanto as quantitativas de cada elemento de entrada das simulações do MMC (Oracle, 2015). Os resultados da análise de sensibilidade do Modelo de ACV estão organizados para o projeto integral e os grupos de disciplinas de cada cenário de análise.

Quanto ao número mínimo de iterações por simulação do MMC, observou-se que as curvas de distribuição de probabilidade do Modelo de ACV permaneceu estável para o projeto integral e os grupos de disciplinas após 20.000 iterações. Portanto, essa foi a quantidade de iterações utilizada para as simulações do MMC desta fase da metodologia.

Cada grupo de disciplina foi simulado individualmente, utilizando apenas os dados de inventário pertinentes àquele grupo de disciplina específico. Para o projeto integral, a simulação considerou a interação de todos os grupos de disciplinas, ou seja, a ação simultânea de todos os dados do inventário do Modelo de ACV na simulação do MMC.

Por fim, a Figura 3.10 apresenta uma descrição básica da organização do Modelo de ACV no Microsoft Excel. Na seção de Apêndices, há um detalhamento mais completo dos campos representados nessa figura, bem como instruções sobre o uso do *software* Crystal Ball para realizar as simulações do MMC.

Figura 3.10 – Campos do Modelo de ACV no Microsoft Excel



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados do Modelo de ACV do projeto da BR-080/DF para os três cenários de análise previamente estabelecidos. Os resultados atribuídos às quatro fases da metodologia estão organizados da seguinte forma:

- a) Fase 1 – dados de engenharia (seção de Apêndices): são elementos preparatórios para as próximas fases da Modelo de ACV e não representam um resultado propriamente dito, mas sim o atendimento das rotinas da primeira fase da metodologia. A relação detalhada dos 32 materiais e 101 equipamentos incluídos no inventário do modelo, juntamente com as outras informações pertinentes a essa fase, constam na Tabela A1 e Tabela A2 da seção de Apêndices, respectivamente.
- b) Fase 2 – dados ambientais (seção 4.1): contém a avaliação da qualidade e a quantificação da incerteza dos dados ambientais dos materiais classificados como prioritários para o Modelo de ACV. As informações são complementadas pelas Tabelas A3, A4, A5 e A6 da seção de Apêndices;
- c) Fase 3 – resultados determinísticos (seção 4.2): aborda os resultados determinísticos referentes às emissões total e unitária de CO₂ eq. do projeto da BR-080/DF, com os complementos contidos nas Tabelas A7, A8 e A9 da seção de Apêndices, e
- d) Fase 4 – resultados probabilísticos (seção 4.3): traz os resultados probabilísticos referentes à emissão unitária de CO₂ eq. do projeto da BR-080/DF, juntamente com a análise de sensibilidade dos resultados, obtidos a partir das simulações do MMC do Modelo de ACV. Os dados estatísticos completos dessa fase estão nas Tabelas A10, A11 e A12 da seção de Apêndices.

Em relação aos cenários de análise, os parâmetros que os diferenciam estão ligados exclusivamente ao insumo cimento, como já foi mencionado. A seguir, estão algumas das características básicas dos cimentos utilizados na construção desses cenários.

a) Cenário BR

Tipo de cimento: Cimento *Portland* CP II-F 32

Declarante: VOTORANTIM CIMENTOS

Representatividade geográfica: Sobradinho, Distrito Federal-DF, Brasil

Representatividade temporal do inventário: 09/2022 – 09/2023

Tipo de declaração ambiental: autodeclaração sem validação por terceiro

FEM_{CIMENTO-BR}: 606 kg CO₂ eq./t de cimento

b) Cenário EUR

Tipo de cimento: *Portland Composite Cement* CEM II

Declarante: CEMBUREAU (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION)

Representatividade geográfica: Europa (dados médios)

Representatividade temporal do inventário: 2016

Tipo de declaração ambiental: autodeclaração com validação por terceiro

FEM_{CIMENTO-EUR}: 683 kg CO₂ eq./t de cimento

c) Cenário EUA

Tipo de cimento: *Blended cement types* (IP, IS, IL, IT)

Declarante: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)

Representatividade geográfica: EUA (dados médios)

Representatividade temporal do inventário: 2019

Tipo de declaração ambiental: autodeclaração com validação por terceiro

FEM_{CIMENTO-EUA}: 742 kg CO₂ eq./t de cimento

É importante destacar que as diferenças entre os três cenários de análise residem nos valores dos FEMs dos cimentos e nas suas respectivas incertezas. Em relação à equivalência entre o tipo de cimento especificado no projeto da BR-080/DF e aqueles produzidos na Europa e nos EUA, procurou-se estabelecer a maior correspondência possível com base nas informações de IBRACON (2022) e Natalli *et al.* (2021). Para o cimento europeu, a equivalência com o tipo de cimento nacional é determinada pela comparação dos teores de adições em suas composições, enquanto para o cimento americano, essa equivalência é baseada na comparação de suas propriedades. Além disso, considerou-se que as diferenças entre os tipos de cimento não interferem significativamente nos traços dos concretos especificados no projeto do DNIT, razão pela qual foram adotados os mesmos quantitativos de dados de engenharia para os três cenários.

4.1 QUALIDADE E INCERTEZA DOS DADOS AMBIENTAIS

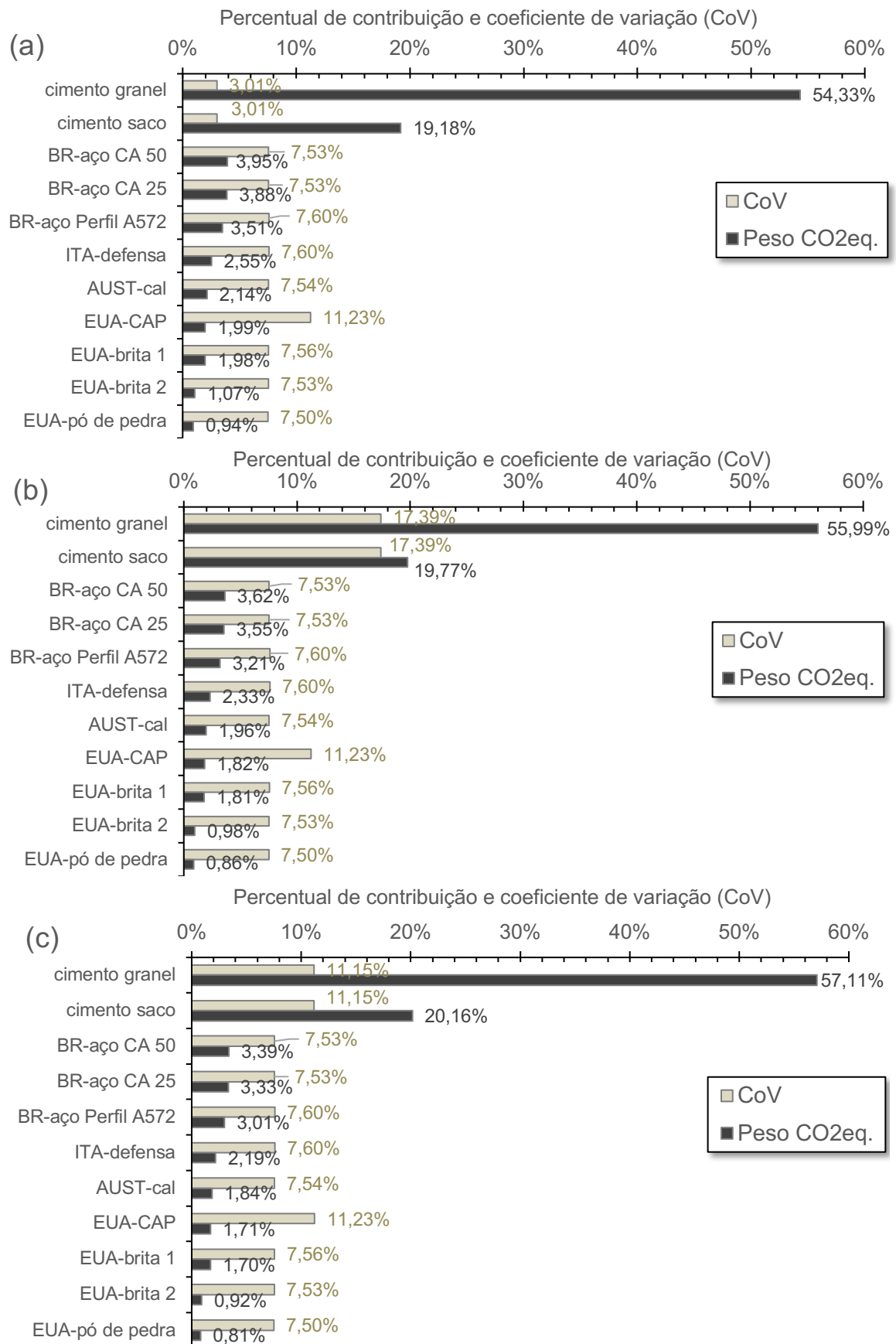
A Tabela 4.1 apresenta os resultados da análise qualitativa dos FEMs selecionados para os materiais que representam 95% ou mais da emissão total de CO₂ eq. atribuída aos materiais listados no projeto da BR-080/DF e incluídos no inventário do Modelo de ACV. Em complemento, a Figura 4.1 apresenta os CoVs e as contribuições individuais desses materiais na referida emissão total. Os resultados apresentados estão associados à seleção final do FEM atribuído a cada material, ou seja, ao fator de emissão do material cujo CoV apresentou o menor valor frente às fontes consultadas.

Tabela 4.1 – Resultado da análise qualitativa dos FEMs dos materiais com as maiores contribuições na emissão total de CO₂ eq. ¹

Indicador	Pontuação do indicador				
	5	4	3	2	1
Confiança na fonte	EUA-cimento				
	BR-aço CA 50				
	BR-aço CA 25				
	BR-aço A572	BR-cimento			
	ITA-defensa	EUR-cimento	—	—	—
	AUST-cal	EUA-CAP			
	EUA-brita 1				
	EUA-brita 2				
	EUA-pó pedra				
Compleitude	BR-cimento				
	BR-aço CA 50				
	BR-aço CA 25				
	ITA-defensa				
	AUST-cal	EUR-cimento	—	—	—
	EUA-CAP	EUA-cimento			
	EUA-brita 1				
	EUA-brita 2				
EUA-pó de pedra					
Correlação Temporal		EUA-cimento			
	BR-cimento	BR-aço CA 50	EUR-cimento		
	ITA-defensa	BR-aço CA 25	EUA-CAP	—	—
	AUST-cal	BR-aço A572	EUA-pó de pedra		
		EUA-brita 1			
		EUA-brita 2			
Correlação Geográfica				EUA-cimento	
				EUR-cimento	
				ITA-defensa	
	BR-cimento	—	BR-aço CA 50	AUST-cal	—
			BR-aço CA 25	EUA-CAP	
			BR-aço A572	EUA-brita 1	
				EUA-brita 2	
			EUA-pó de pedra		
Correlação Tecnológica		BR-aço CA 50			
		BR-aço CA 25			
		BR-aço A572	ITA-defensa		
	BR-cimento	EUA-brita 1	AUST-cal	EUA-cimento	
		EUA-brita 2	EUA-CAP	EUR-cimento	—
		EUA-pó de pedra			

Nota ¹ Os parâmetros que subsidiam a análise qualitativa e quantitativa das incertezas dos dados ambientais de todos os materiais do Modelo de ACV estão disponíveis nas Tabelas A3, A4, A5 e A6 da seção de Apêndices. Os prefixos nos nomes dos materiais indicam o país de origem de seu FEM.

Figura 4.1 –Participação dos materiais mais relevantes para a emissão total de CO₂ eq. e CoV correspondente: (a) cenário BR, (b) cenário EUR e (c) cenário EUA



A partir da Tabela 4.1 e da Figura 4.1, observa-se que dos 32 materiais incluídos no inventário do Modelo de ACV, um grupo composto por 11 insumos é responsável por pelo menos 95% da emissão total de CO₂ eq. dos materiais em todos os cenários. Os cimentos, tanto a granel quanto em saco, destacam-se nesse grupo, representando juntos 73,51% no cenário BR, 75,76% no cenário EUR e 77,27% no cenário EUA. Em seguida, o aço CA-50, aço CA-25, perfil ASTM A572 e a defesa metálica apresentam contribuições ambientais intermediárias, porém consideravelmente inferiores às dos cimentos. Já os materiais integrados pela cal, CAP e materiais pétreos têm as menores contribuições individuais desse grupo, abaixo de 2,20% em todos os cenários.

Os FEMs do Modelo de ACV têm origens nacional e internacional, uma vez que não há referências locais com acesso público para todos os materiais do inventário e que atendam às exigências estipuladas na seção 3.4.1 da metodologia. Apesar disso, os FEMs selecionados têm uma elevada representatividade nacional, especialmente para os insumos do grupo responsável pela contribuição mínima de 95% da emissão total de CO₂ eq. dos materiais. No cenário BR, os insumos com FEMs nacionais incluem o cimento (a granel e em saco), aço CA-50, aço CA-25 e perfil ASTM A572, respondendo juntos por aproximadamente 84% da emissão total dos materiais, sendo que apenas o cimento produzido na região de execução das obras é responsável por aproximadamente 74% desse total. A origem dos FEMs dos demais insumos incluídos no grupo de materiais prioritários é formada por fontes da Austrália (AUST), Itália (ITA) e EUA.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 também demonstram que as variações nos CoVs dos FEMs estão fortemente influenciadas pelos indicadores de correlação temporal, geográfica e tecnológica da Matriz Pedigree, com notas variando entre 2 (pior qualidade) e 5 (melhor qualidade). Os indicadores de confiança na fonte e completude apresentaram pontuações elevadas (4 e 5), devido à seleção de referências com declarações ambientais que atenderam às especificações das normas ISO 14025 (2009), ISO 14040 (2006), ISO 14044 (2006), EN 15804+A1 (2013) e EN 15804+A2 (2019). Excluindo os cimentos, os demais materiais apresentam CoVs médios de 7,55% (aço CA-50, aço CA-25, perfil ASTM A572, defesa metálica e materiais pétreos) e 11,23% (CAP). Quanto aos CoVs dos cimentos, o brasileiro apresentou o menor valor associado (3,01%), seguido pelo americano (11,15%) e europeu (17,39%). Na Figura 4.1, nota-se em cada cenário que não há distinção de valor entre os CoVs dos cimentos a granel e em saco, isso porque foi adotado o mesmo FEM para ambos os cimentos.

Os resultados apresentados indicam que o cimento é um elemento de inventário crítico para o Modelo de ACV do projeto da BR-080/DF, tanto em relação à incerteza quanto a sua participação relativa nos resultados. Em segundo plano, estão o aço CA-50, aço CA-25, perfil ASTM A572 e a defesa metálica. No entanto, a influência conjunta dos parâmetros qualitativos e quantitativos de todos os elementos do inventário (ou seja, todos os insumos com os seus respectivos quantitativos, fatores de emissão e incertezas) nos resultados será discutida de forma mais aprofundada na seção 4.3, com a análise dos resultados probabilísticos do Modelo de ACV relativos ao projeto integral e seus grupos de disciplinas.

4.2 RESULTADOS DETERMINÍSTICOS

A presente seção apresenta os resultados determinísticos referentes à emissão total e unitária de CO₂ eq. do projeto da BR-080/DF para os três cenários de análise. Cabe lembrar que os resultados do Modelo de ACV estão estruturados em fases classificadas como Material, abrangendo todos os materiais e os equipamentos utilizados na produção ou processamento desses materiais; Transporte, englobando todas as operações de transporte do projeto; e Obra, compreendendo as operações dos equipamentos que atuam diretamente nas atividades de campo. A partir deste ponto, “grupos de disciplinas” e “disciplinas” serão tratados como termos sinônimos.

4.2.1 Emissão total de CO₂ equivalente

A Tabela 4.2 apresenta os resultados de emissão total de CO₂ eq., segundo as fases de ACV, cenários de análise, projeto integral e suas disciplinas. Também estão descritos os valores globais de emissão associados a cada disciplina de projeto e cenário de análise, que representam o somatório dos valores correspondentes às emissões totais de CO₂ eq. de suas fases de ACV.

A Tabela 4.2 mostra que as diferenças entre os três cenários estão relacionadas apenas à fase Material, um comportamento motivado pelas diferenças entre os valores do FEM do cimento CP II-F 32 produzido no Brasil e do equivalente produzido na Europa e nos EUA. A análise dos valores relativos à fase Material revela que as principais diferenças entre os cenários estão nas disciplinas de construção do pavimento novo, restauração do pavimento e drenagem/OAC. Essas disciplinas de projeto apresentam uma maior proporção de cimento em suas composições de serviço, o que contribui para as maiores diferenças relativas nos resultados de ACV.

Tabela 4.2 – Emissão total de CO₂ eq. segundo fases de ACV e cenários (em t CO₂ eq.)

Disciplina	Fase de ACV e Cenário					Valor global		
	Material			Transp.	Obra	BR	EUR	EUA
	BR	EUR	EUA	BR EUR EUA	BR EUR EUA			
Projeto integral	65.334	71.396	76.040	15.365	2.261	82.960	89.022	93.667
Terraplanagem	2.283	2.283	2.283	6.785	975	10.044	10.044	10.044
Pav. restauração	15.608	16.940	17.960	2.000	195	17.804	19.136	20.156
Pav. novo	37.245	41.281	44.373	4.184	340	41.770	45.805	48.897
OAE	1.948	2.076	2.174	95	173	2.216	2.344	2.443
Drenagem e OAC	4.075	4.424	4.692	77	147	4.300	4.649	4.916
Demais serviços	4.174	4.392	4.558	2.221	430	6.826	7.044	7.211

Em relação aos valores globais de emissão de CO₂ eq., é possível notar na Tabela 4.2 que o projeto integral do cenário BR apresenta o menor valor entre os três cenários, totalizando 82.960 t. Considerando o cenário brasileiro como referência, o cenário EUR apresenta 89.022 t, o que representa um aumento de 7,31%. Já o cenário EUA registra 93.667 t, um aumento de 12,91% em relação ao cenário nacional. A Tabela 4.3 mostra as demais diferenças nos valores globais de CO₂ eq. entre os três cenários.

Tabela 4.3 – Diferenças na emissão global de CO₂ eq. dos cenários
(valores normalizados em relação ao Cenário BR)

Disciplina	Cenário		
	BR	EUR	EUA
Projeto integral	1	1,0731	1,1291
Terraplanagem	1	1	1
Pav. restauração	1	1,0748	1,1321
Pav. novo	1	1,0966	1,1706
OAE	1	1,0579	1,1022
Drenagem e OAC	1	1,0812	1,1434
Demais serviços	1	1,0319	1,0563

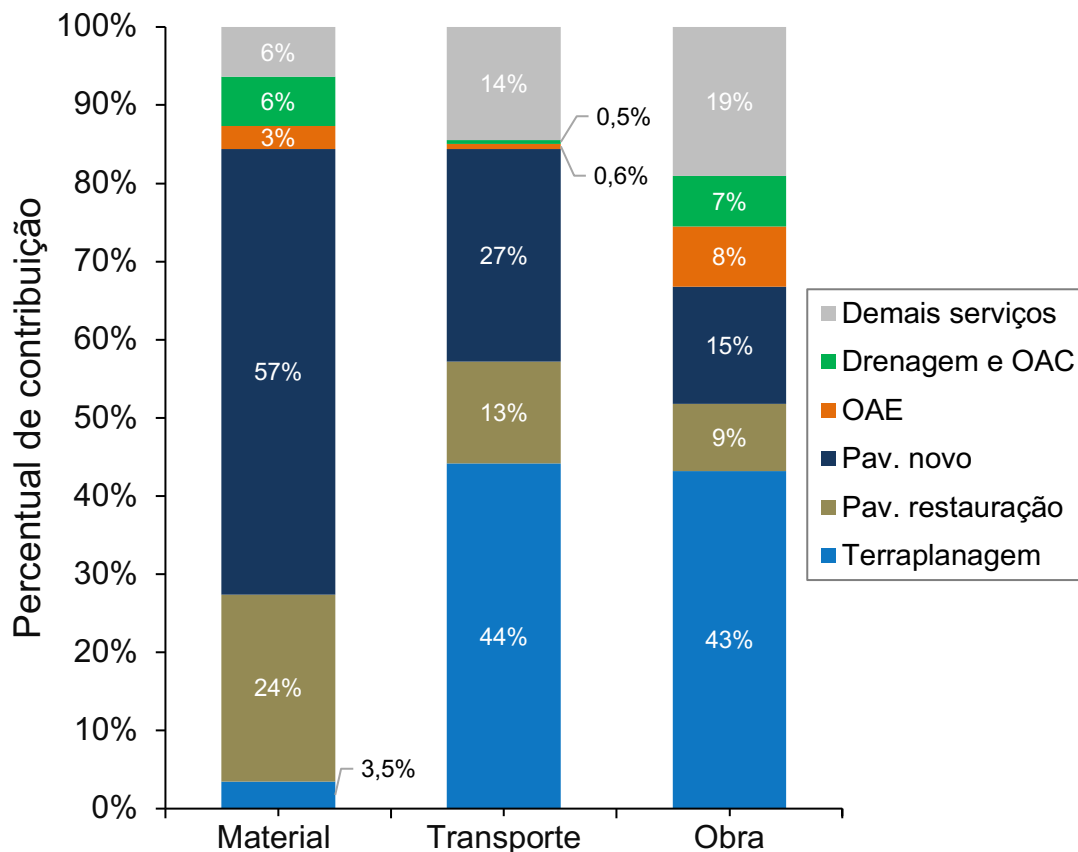
A partir da Tabela 4.3, observa-se que o pavimento novo é a disciplina de projeto que tem as maiores diferenças no valor global de CO₂ eq. entre os cenários. Adotando o cenário BR como base, é possível notar que o pavimento novo do cenário EUR é superior em 9,66%, enquanto no cenário EUA esse acréscimo é de 17,06%. Como já foi mencionado, esse comportamento está relacionado à maior participação do insumo cimento nas composições de serviço que integram o subsistema dessa disciplina, cujos resultados de ACV tendem a acompanhar as diferenças dos FEMs relativos aos cimentos empregados nos cenários em análise.

A Tabela 4.4 e a Figura 4.2 apresentam a contribuição individual das disciplinas na emissão total de CO₂ eq. do projeto integral, segundo as fases de ACV e os cenários de análise.

Tabela 4.4 - Contribuição das disciplinas de projeto na emissão total de CO₂ eq. segundo fases de ACV (valores normalizados em relação ao projeto integral)

Disciplina	Fase de ACV e Cenário				
	Material			Transp.	Obra
	BR	EUR	EUA	BR EUR EUA	BR EUR EUA
Projeto integral	1	1	1	1	1
Terraplanagem	0,035	0,032	0,030	0,442	0,431
Pav. restauração	0,239	0,237	0,236	0,130	0,086
Pav. novo	0,570	0,578	0,584	0,272	0,150
OAE	0,030	0,029	0,029	0,006	0,077
Drenagem e OAC	0,062	0,062	0,062	0,005	0,065
Demais serviços	0,064	0,062	0,060	0,145	0,190

Figura 4.2 - Contribuição das disciplinas na emissão total de CO₂ eq. segundo fases ACV ¹



Nota ¹ Para a fase de ACV Material foram adotadas as médias dos valores entre os três cenários. Para as fases de ACV Obra e Transporte não há diferenças entre os cenários.

A Tabela 4.4 mostra que na fase Material as proporções de cada disciplina na contribuição do total de CO₂ eq. do projeto integral apresentam pequenas diferenças entre os cenários, que a exemplo da OAE variam entre 0,029 e 0,030. Constata-se também que as disciplinas relacionadas à pavimentação predominam na contribuição do total de CO₂ eq. da fase Material. Considerando a média entre os três cenários, o pavimento novo responde por 57% da emissão total dessa fase, seguido pela restauração do pavimento com 24%. Em conjunto, essas disciplinas respondem por aproximadamente 81% da emissão total de CO₂ eq. da fase Material do projeto da BR-080/DF.

Ainda em relação à fase Material, observa-se na Tabela 4.4 e Figura 4.2 que as disciplinas drenagem/OAC e demais serviços contribuem individualmente com aproximadamente 6%, totalizando 12% na emissão total de CO₂ eq. dessa fase. Além disso, é possível notar que a disciplina OAE, apesar de possuir proporções significativas de cimento e aço em suas composições de serviço (insumos com elevados valores de FEM) contribui com apenas 3% da emissão total da fase Material. Esse comportamento é explicado pela baixa

representatividade da disciplina de OAE nos quantitativos totais do projeto da BR-080/DF. A disciplina de terraplanagem contribui com aproximadamente 3,5% da emissão total de CO₂ eq. da fase Material, resultado influenciado pelo uso de perfis metálicos (Perfil ASTM A572 G50) na execução de aterros em solo com baixa capacidade de suporte.

A partir da Figura 4.2, nota-se que as emissões de CO₂ eq. da fase Transporte são lideradas pelas disciplinas de terraplanagem (44%) e pavimento novo (27%), seguidas pelos demais serviços (14%) e restauração do pavimento (13%). As disciplinas de OAE e drenagem/OAC apresentam contribuições individuais pequenas nessa fase, inferiores a 1%. O predomínio da disciplina de terraplanagem nessa fase é justificado pela natureza de seus serviços, como o transporte de materiais das jazidas de empréstimo para as frentes de obra, onde a DMT chega a alcançar 61,56 km para uma das jazidas indicadas no projeto, conforme apresentado na Tabela 3.1 (seção 3.2). Para a disciplina de pavimento novo, o predomínio é explicado pelo transporte de grandes quantidades de insumos, como aço (com DMT de 60,4 km) e cimento (com DMT de 65,6 km – Tabela 3.1 e Figura 3.2), dos centros fornecedores para o canteiro de obras ou frentes de serviço em campo. Essa justificativa pode ser estendida às disciplinas de demais serviços e restauração do pavimento, embora com volumes de insumos inferiores aos do pavimento novo, e, portanto, com menores contribuições na emissão total de CO₂ eq. da fase Transporte.

Na fase Obra, observa-se na Figura 4.2 que a disciplina de terraplanagem se destaca em relação às outras na emissão total de CO₂ eq., contribuindo com 43% de seu valor total. Em seguida, os demais serviços (com 19%) e o pavimento novo (com 15%) ocupam o segundo e terceiro lugares em termos de contribuição para o total de CO₂ eq. dessa fase. As proporções identificadas estão relacionadas às diferenças de desempenho dos equipamentos e aos volumes de serviços relacionados a cada disciplina de projeto, refletidos na carga horária total de operação e, conseqüentemente, no consumo total de combustível pelos equipamentos que atuam em campo.

A Tabela 4.5 apresenta a contribuição das fases de ACV na emissão total de CO₂ eq. do projeto integral e suas disciplinas. Nessa tabela, o somatório das frações correspondentes às fases Material (M), Transporte (T) e Obra (O) do projeto integral e de cada disciplina totalizam uma unidade.

Tabela 4.5 - Contribuição das fases de ACV na emissão total de CO₂ eq. do projeto integral e de suas disciplinas

Disciplina	Cenário e Fase de ACV								
	BR			EUR			EUA		
	M	T	O	M	T	O	M	T	O
Projeto integral	0,788	0,185	0,027	0,802	0,173	0,025	0,812	0,164	0,024
Terraplanagem	0,227	0,676	0,097	0,227	0,676	0,097	0,227	0,676	0,097
Pav. restauração	0,877	0,112	0,011	0,885	0,105	0,010	0,891	0,099	0,010
Pav. novo	0,892	0,100	0,008	0,901	0,091	0,007	0,907	0,086	0,007
OAE	0,879	0,043	0,078	0,886	0,041	0,074	0,890	0,039	0,071
Drenagem e OAC	0,948	0,018	0,034	0,952	0,017	0,032	0,954	0,016	0,030
Demais serviços	0,611	0,325	0,063	0,623	0,315	0,061	0,632	0,308	0,060

M: fase Material, O: fase Obra e T: fase Transporte.

Na Tabela 4.5, observa-se que a fase Material se destaca na emissão total de CO₂ eq. do projeto integral em todos os cenários avaliados. No cenário BR, essa fase de ACV contribui com 78,8% das emissões totais do projeto, enquanto no cenário EUR esse valor é de 80,2%. No cenário EUA, essa contribuição é de 81,2%. Esses resultados demonstram, mais uma vez, a influência dos diferentes fatores de emissão unitária de CO₂ eq. (FEM) do cimento brasileiro, europeu e americano nos resultados determinísticos do Modelo de ACV. A Figura 4.3 traz uma representação das contribuições das fases de ACV para a emissão total do projeto integral, enquanto a Figura 4.4 mostra a influência média das fases de ACV na emissão total de cada disciplina.

Figura 4.3 - Contribuição das fases de ACV na emissão total de CO₂ eq. do projeto integral

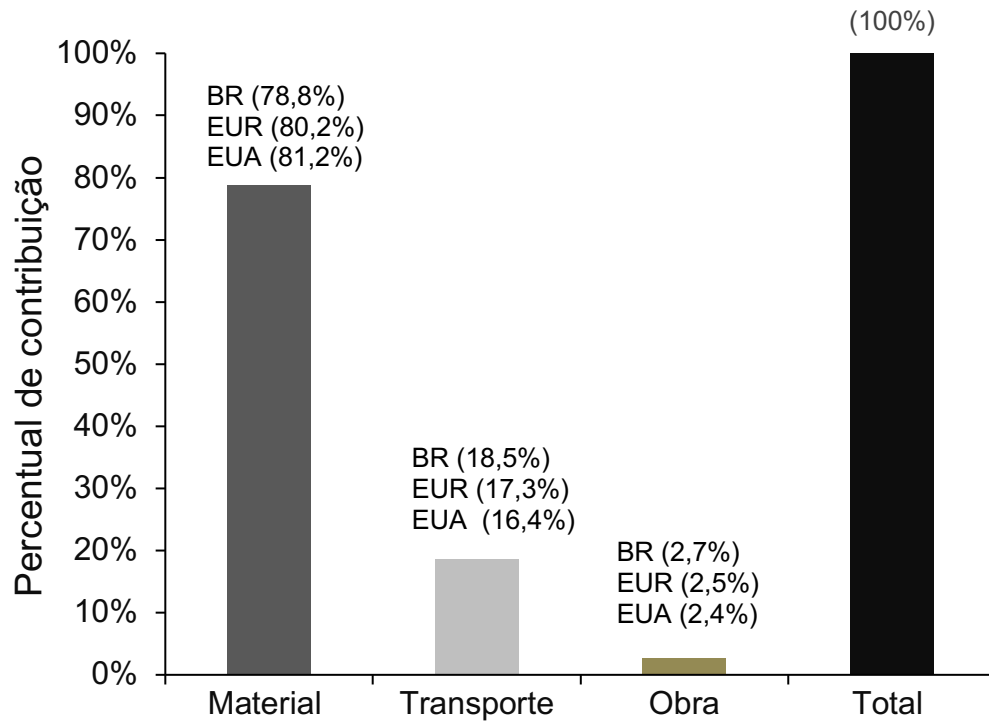
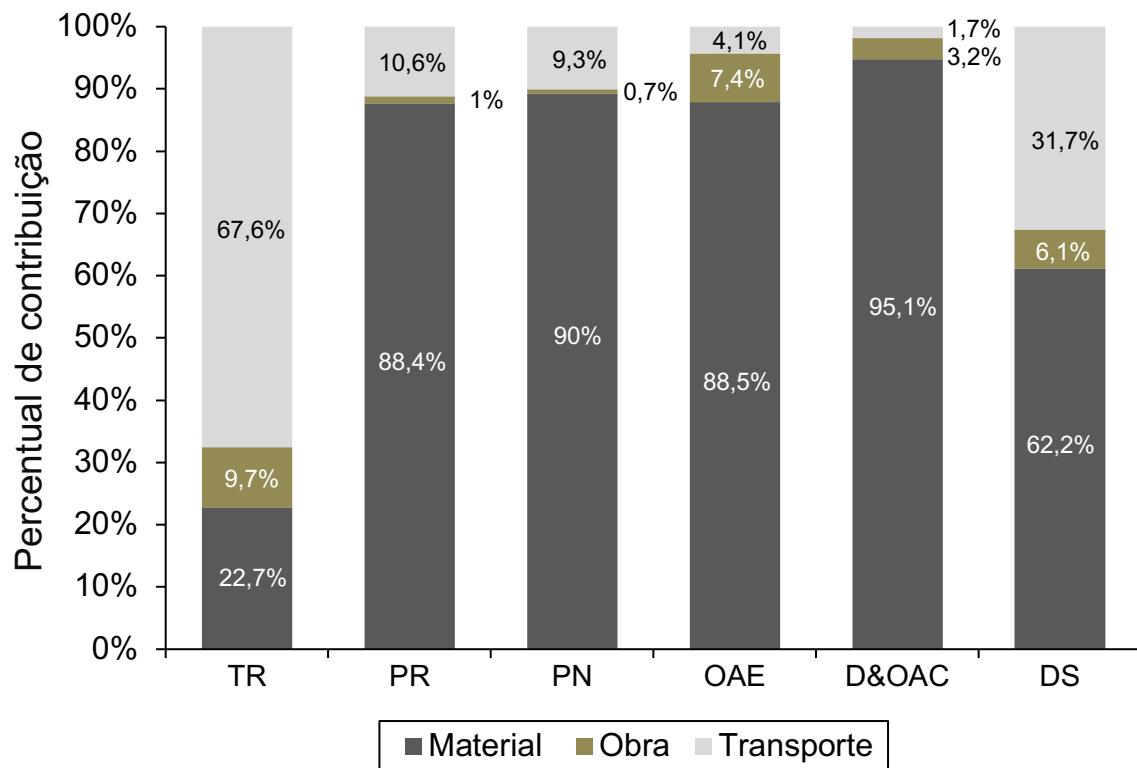


Figura 4.4 - Contribuição das fases de ACV na emissão total de CO₂ eq. das disciplinas de projeto (valores médios ¹)



Nota ¹ Adotadas as médias de valor entre os três cenários para todas as disciplinas. Acrônimos: TR: terraplanagem; PR: pavimento-restauração; PN: pavimento novo; OAE: obra de arte especial; D&OAC: drenagem e obra de arte corrente; DS: demais serviços.

A Figura 4.3 mostra as diferenças entre a contribuição das fases de ACV para a emissão total de CO₂ eq. do projeto da BR-080/DF. Nota-se que a fase Obra possui uma contribuição relativamente baixa em comparação com as outras fases, com uma média entre os três cenários analisados de 2,5%. A fase Transporte, governada principalmente pela operação dos caminhões basculantes com capacidade de 14 m³ e 10 m³ (seção de Apêndices, Tabela A2) exibe uma contribuição na emissão total de CO₂ eq. do projeto que varia entre 18,5% (cenário BR) e 16,4% (cenário EUA).

Embora existam diferenças em relação às soluções de pavimentação e as classes de projeto das rodovias, pode-se afirmar que as proporções entre as fases de ACV desta pesquisa estão próximas das descritas na literatura (Chaudhary; Akhtar, 2024; Praticò *et al.*, 2020; Souza, 2017). Segundo relatório divulgado pelo Banco Mundial (WBG, 2011), a fase Material é responsável por cerca de 75-80% das emissões totais associadas à execução de empreendimentos rodoviários, seguida da fase Transporte com 20-25%, e da fase Obra com contribuição inferior a 5%. A principal diferença entre os resultados da literatura e os desta pesquisa está na fase Transporte, e de forma secundária na fase Obra (Figura 4.3).

No entanto, é possível que as reais contribuições das fases Transporte e Obra para as emissões totais do projeto da BR-080/DF sejam maiores. Inicialmente, isso se deve ao fato de que os parâmetros de desempenho operacional dos equipamentos do SICRO (DNIT, 2022b, 2023) utilizados nesta pesquisa referem-se a equipamentos novos e com tecnologias atualizadas, podendo não corresponder à realidade nas obras brasileiras. Em segundo lugar, as premissas adotadas na segunda fase da metodologia desta pesquisa não consideram as incertezas inerentes às condições de operação dos equipamentos, tal como a influência da irregularidade da superfície de rolamento no consumo médio de combustíveis, o que pode aumentar as emissões totais de CO₂ eq. dessas duas fases de ACV.

Na Figura 4.4, é possível notar a influência da fase Material sobre as emissões totais das disciplinas de pavimento novo, pavimento restaurado, OAE, drenagem/OAC e demais serviços. Em relação à disciplina de terraplanagem, suas emissões são majoritariamente governadas pela fase Transporte com 67,6%, seguida pela fase Material, contribuindo com 22,7%, enquanto a fase Obra contribui com 9,7%.

Em relação à disciplina de terraplanagem, é importante ponderar que a contribuição da fase Material em sua emissão total de CO₂ eq. provavelmente não segue o padrão observado em

outros empreendimentos rodoviários de características semelhantes. Como já foi mencionado, o projeto da BR-080/DF prevê a execução pontual de aterros estaqueados com perfis metálicos, o que aumenta o percentual da fase Material nessa disciplina. Nesse contexto, evidencia-se a importância de conduzir estudos de ACV para cada projeto e suas principais disciplinas, pois os valores de emissão podem variar significativamente em função das soluções de engenharia adotadas em cada situação.

A emissão relativa à disciplina de OAE desta pesquisa também deve ser interpretada com cautela e reforça a observação do parágrafo anterior, especialmente se for utilizada em comparação com outros estudos de caso. Isso se deve à variabilidade das intervenções e aos tipos de estruturas previstos no projeto da BR-080/DF, que envolve o alargamento de uma estrutura existente e a construção de outras três: viaduto, ponte e passarela para pedestres, conforme informado na seção 3.2 da metodologia. Assim, é possível que os resultados (total e unitário) de emissão de CO₂ eq. da disciplina de OAE desta pesquisa não sejam similares aos de outros estudos, especialmente aqueles que preveem apenas a construção de novas pontes ou viadutos.

4.2.2 Emissão unitária de CO₂ equivalente

Nesta subseção são apresentados os resultados de emissão unitária de CO₂ eq. para o projeto integral e suas disciplinas, ou seja, os valores de emissão relativos às unidades funcionais estabelecidas na metodologia desta pesquisa (seção 3.5). Isso implica na reexibição dos resultados da seção anterior, dividindo-os pela extensão total do projeto da BR-080/DF (24,60 km). A disciplina de OAE é a única exceção, cujo valor é dividido pela área total de tabuleiro novo construído (2.018,18 m²). Há também os valores de emissão unitária global de CO₂ eq., os quais são o somatório das emissões unitárias das fases ACV de cada cenário de análise, organizados segundo o projeto integral e suas disciplinas.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de emissão unitária de CO₂ eq., enquanto a Tabela 4.7 apresenta os resultados relativos à emissão unitária global. Os resultados dessa última tabela estão representados de forma gráfica na Figura 4.5.

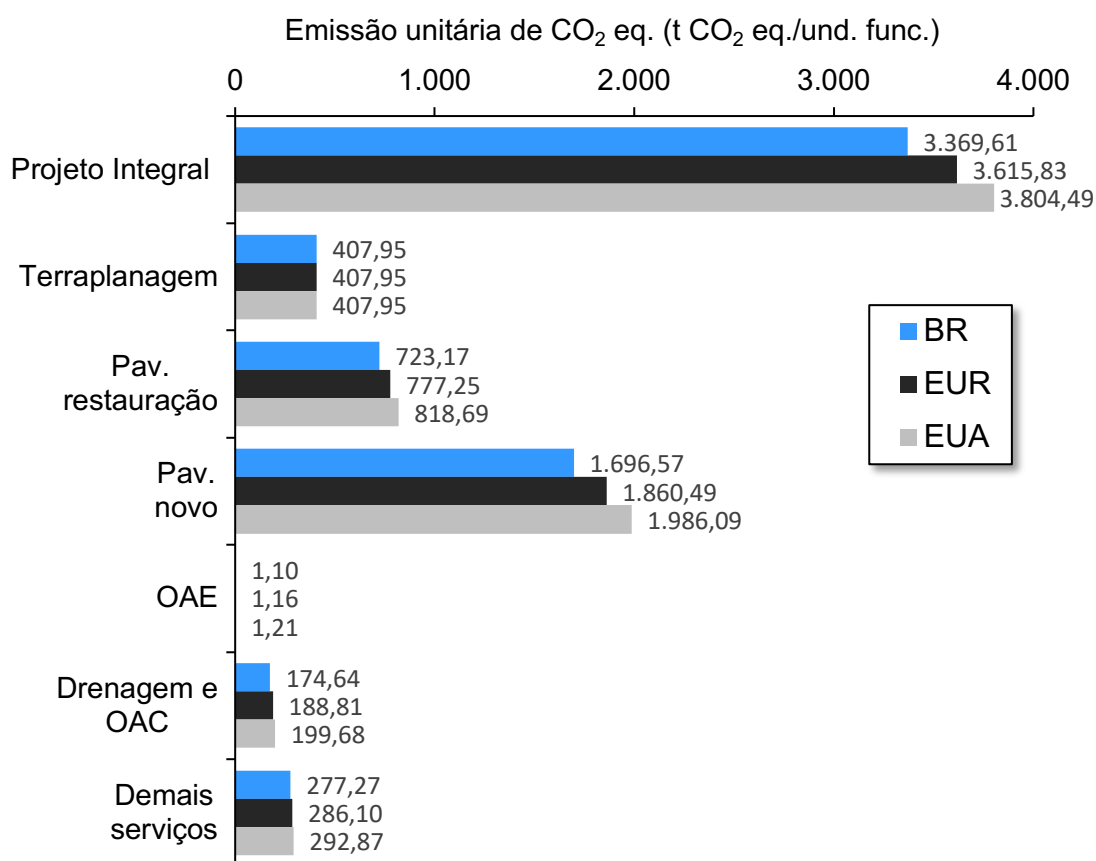
Tabela 4.6 - Emissão unitária de CO₂ eq. segundo fases de ACV e cenários

Disciplina	Und.	Fase de ACV e Cenário				
		Material			Transp.	Obra
		BR	EUR	EUA	BR EUR EUA	BR EUR EUA
Projeto integral	t CO ₂ eq./km	2.653,68	2.899,90	3.088,56	624,09	91,83
Terraplanagem	t CO ₂ eq./km	92,72	92,72	92,72	275,60	39,62
Pav. restauração	t CO ₂ eq./km	633,97	688,05	729,50	81,27	7,93
Pav. novo	t CO ₂ eq./km	1.512,80	1.676,71	1.802,31	169,98	13,80
OAE	t CO ₂ eq./m ²	0,97	1,03	1,08	0,05	0,09
Drenagem e OAC	t CO ₂ eq./km	165,53	179,70	190,57	3,14	5,98
Demais serviços	t CO ₂ eq./km	169,55	178,38	185,15	90,25	17,47

Tabela 4.7 - Emissão unitária global de CO₂ eq. dos cenários

Disciplina	Und.	Cenário		
		BR	EUR	EUA
Projeto integral	t CO ₂ eq./km	3.369,61	3.615,83	3.804,49
Terraplanagem	t CO ₂ eq./km	407,95	407,95	407,95
Pav. restauração	t CO ₂ eq./km	723,17	777,25	818,69
Pav. novo	t CO ₂ eq./km	1.696,57	1.860,49	1.986,09
OAE	t CO ₂ eq./m ²	1,10	1,16	1,21
Drenagem e OAC	t CO ₂ eq./km	174,64	188,81	199,68
Demais serviços	t CO ₂ eq./km	277,27	286,10	292,87

Figura 4.5 – Emissão unitária global de CO₂ eq. dos cenários ¹



Nota ¹ Para a disciplina de OAE adotou-se a unidade funcional de 1 m², enquanto para as demais disciplinas e para o projeto integral 1 km, conforme especificado na seção 3.5.

Os resultados destacam o pavimento novo como a principal fonte de emissão unitária global de CO₂ eq. do projeto, com valores de 1.696,57 t CO₂ eq./km no cenário BR, 1.8060,49 t CO₂ eq./km no cenário EUR e 1.986,09 t CO₂ eq./km no cenário EUA. Esses resultados apresentam uma ordem de grandeza similar ao observado na literatura. Apesar de não ser possível estabelecer uma comparação direta devido às diferenças nas espessuras das camadas do pavimento e nas DMTs dos projetos, bem como às variações nas fontes de dados ambientais, em uma pesquisa semelhante conduzida por Souza (2017) — que utilizou um sistema com os parâmetros dos equipamentos do SICRO vigente à época — foi encontrado um valor de 1.725 t CO₂ eq./km para a disciplina de pavimento rígido novo, considerando as fases de produção de materiais, transporte e obras.

Na sequência, a restauração do pavimento, com resultados que variam entre 723,17 t CO₂ eq./km (cenário BR) e 818,69 t CO₂ eq./km (cenário EUA), e a terraplanagem com 407,95 t CO₂ eq./km, ocupam respectivamente a segunda e terceira posições em termos de emissões unitárias globais do projeto da BR-080/DF. Em conjunto com o pavimento novo, essas

disciplinas podem ser consideradas as mais relevantes para a emissão total de CO₂ eq. do projeto em questão.

Nesse contexto, os resultados demonstram que os estudos de ACV de rodovias, ao investigarem as disciplinas de pavimentação (novo e restaurado), concentram-se nas disciplinas de projeto críticas para o indicador ambiental de aquecimento global. No entanto, os resultados evidenciam também que a disciplina de terraplanagem é uma variável relevante no que diz respeito à emissão de CO₂ eq. e não deve ser desconsiderada nesses estudos. Apesar de ocupar a terceira posição em termos de emissões unitárias no projeto da BR-080/DF (Figura 4.5), o valor real associado à disciplina de terraplanagem pode ser ainda maior, tendo em vista as premissas conservadoras empregadas na metodologia desta pesquisa em relação às condições de operação e aos parâmetros de desempenho dos equipamentos do SICRO, conforme descrito na seção anterior.

Além disso, o resultado da disciplina de terraplanagem é diretamente impactado pelas DMTs entre as jazidas de solo e as frentes de serviço em campo. A título de exemplo, uma majoração de 100% no atual valor médio de 33,77 km das DMTs das jazidas de solo do projeto (Tabela 3.1, seção 3.2) elevaria a emissão unitária dessa disciplina em 68%, resultando em 683,55 t CO₂ eq./km. Nessa simulação, as disciplinas de terraplanagem e restauração do pavimento apresentam valores próximos no cenário BR, o que resultaria em uma equivalência em termos de contribuição para a emissão total do projeto. Isso reforça a importância de considerar a terraplanagem nos estudos de ACV de rodovias.

As disciplinas de demais serviços, drenagem/OAC e OAE estão classificadas na quarta, quinta e sexta posições em termos de emissões unitárias de CO₂ eq. As duas primeiras apresentam médias entre os três cenários de 285 t CO₂ eq./km e 187,71 t CO₂ eq./km, respectivamente, com pequenas diferenças entre os valores absolutos dos cenários. A disciplina de OAE também demonstra uma pequena variação entre os valores absolutos dos três cenários, com uma emissão unitária média entre os cenários de 1,16 t CO₂ eq./m².

Por fim, ao analisar os valores da Tabela 4.7 relativos ao projeto integral, verifica-se que o cenário BR exibe a menor emissão unitária global de CO₂ eq. entre os cenários investigados, totalizando 3.369,61 t CO₂ eq./km. As diferenças percentuais entre o resultado do cenário nacional e dos demais cenários seguem os percentuais já informados na seção anterior, ou seja, houve um aumento na emissão unitária global do projeto de 7,31% no cenário EUR e

12,91% no cenário EUA. Essas diferenças demonstram a elevada sensibilidade do resultado determinístico do Modelo de ACV às variações de valor do FEM do cimento.

4.3 RESULTADOS PROBABILÍSTICOS

4.3.1 Emissão unitária de CO₂ equivalente e incerteza global

A Tabela 4.8 fornece os principais dados de saída das simulações do MMC do Modelo de ACV para o projeto integral e suas disciplinas, categorizados pelos cenários BR, EUR e EUA. As Tabelas A10, A11 e A12 na seção de Apêndices contêm a estatística descritiva completa dos resultados probabilísticos.

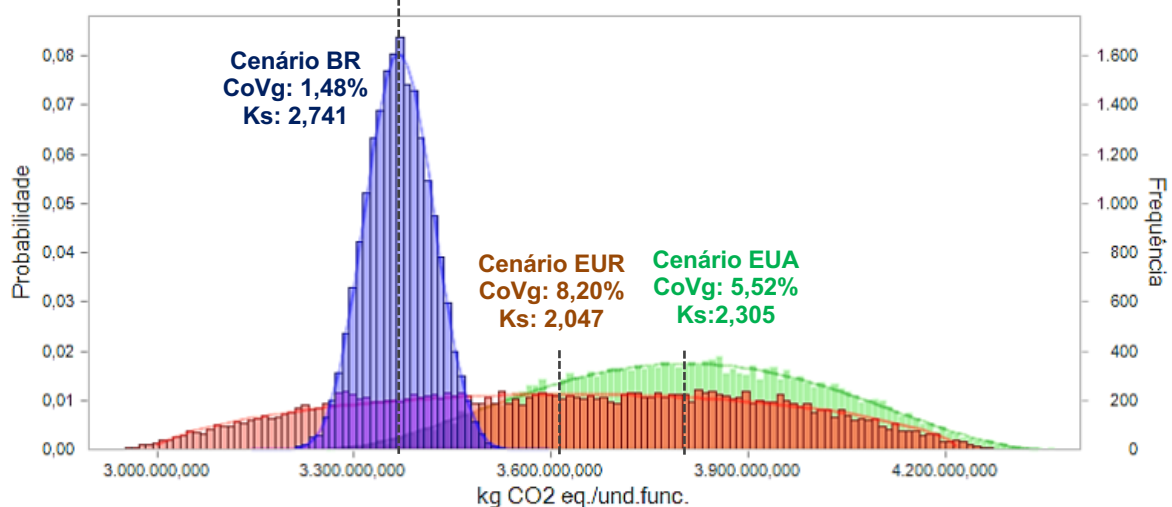
Tabela 4.8 – Resultados probabilísticos parciais dos cenários BR, EUR e EUA ¹

Disciplina	Cenário	Und. funcional	CO ₂ eq. (2,5%)	CO ₂ eq. médio	CO ₂ eq. (97,5%)	CoVg
Projeto integral	BR		3.271,94	3.369,51	3.464,88	1,48%
	EUR	t CO ₂ eq./km	3.089,08	3.618,30	4.143,75	8,20%
	EUA		3.415,89	3.805,34	4.192,04	5,52%
Terraplanagem	BR					
	EUR	t CO ₂ eq./km	388,63	407,92	426,95	2,44%
	EUA					
Pav. restauração	BR		694,09	723,14	752,17	2,07%
	EUR	t CO ₂ eq./km	639,52	777,81	915,31	10,78%
	EUA		711,38	818,49	924,83	7,19%
Pav. novo	BR		1.634,81	1.696,30	1.757,21	1,88%
	EUR	t CO ₂ eq./km	1.504,88	1.859,60	2.212,86	10,79%
	EUA		1.727,07	1.985,12	2.247,65	7,11%
OAE	BR		1,00	1,10	1,19	2,93%
	EUR	t CO ₂ eq./m ²	1,01	1,16	1,31	6,84%
	EUA		1,10	1,21	1,33	4,95%
Drenagem e OAC	BR		166,57	174,68	182,85	2,41%
	EUR	t CO ₂ eq./km	152,43	189,10	225,13	11,63%
	EUA		171,53	199,60	227,75	7,74%
Demais serviços	BR		266,37	277,27	288,38	2,08%
	EUR	t CO ₂ eq./km	260,20	286,21	312,33	5,11%
	EUA		271,92	292,83	313,69	3,77%

Nota ¹ Representam as saídas do MMC após a realização de 20.000 iterações por simulação. Acrônimos: CoVg – coeficiente de variação global; CO₂ eq. (2,5%) – valor associado ao limite inferior do IC de 95%; CO₂ eq. médio – valor observado da média amostral (\bar{X}), considerado como uma estimativa da média populacional (μ); CO₂ eq. (97,5%) – valor associado ao limite superior do IC de 95%.

A partir da Tabela 4.8, nota-se que para o projeto integral o cenário BR exibe o menor CoVg (1,48%), seguido pelo cenário EUA (5,52%) e o cenário EUR com o maior coeficiente global (8,20%). Essa mesma ordem de classificação entre os cenários é mantida para as disciplinas de projeto, com exceção da terraplanagem, que, por não incluir cimento em suas composições de serviço, não apresenta diferença no valor do CoVg. As disciplinas de pavimento novo, pavimento restaurado e drenagem/OAC se destacam por apresentarem os maiores valores de CoVg, indicando que os resultados probabilísticos dessas disciplinas têm um maior nível de incerteza. Esses resultados demonstram a influência da propriedade qualitativa (CoV) dos dados ambientais dos cimentos nos resultados probabilísticos do Modelo de ACV, uma vez que é o único insumo do modelo com variações de parâmetro entre os cenários. A Figura 4.6 exemplifica essa influência com a comparação das curvas de distribuição de probabilidade obtidas a partir da simulação do Modelo de ACV do projeto integral dos cenários BR, EUR e EUA.

Figura 4.6 - Curvas de distribuição probabilidade de saída do Modelo de ACV do projeto integral dos cenários BR, EUA e EUR



Acrônimos: CoVg – coeficiente de variação global, Ks – coeficiente de curtose.

A Figura 4.6 revela que as curvas de distribuição de probabilidade do projeto integral são simétricas, com média e mediana praticamente idênticas. No cenário BR, por exemplo, são 3.369,51 e 3.369,29 t CO₂ eq./km, respectivamente. Já quanto à forma de distribuição dessas curvas, o *software* Crystal Ball expressa a sua maior ou menor aproximação com a distribuição do tipo normal a partir de um parâmetro adimensional, definido como coeficiente de curtose (k_s) e interpretado da seguinte forma (Fávero; Belfiore, 2022):

- a) Se $k_s = 3$, a curva apresenta uma distribuição normal (mesocúrtica);

- b) Se $k_s < 3$, a curva apresenta uma distribuição achatada (platicúrtica), e
- c) Se $k_s > 3$, a curva apresenta uma distribuição alongada (leptocúrtica).

Logo, à medida que o valor de k_s se aproxima de 3, a curva de distribuição de probabilidade tende a se tornar mais próxima da normal. Os resultados associados ao projeto integral revelam que o cenário BR apresenta a curva de distribuição mais próxima da normal, com $k_s = 2,741$ (Tabela A10), seguido pelo cenário EUA com $k_s = 2,305$ (Tabela A11) e o cenário EUR com $k_s = 2,047$ (Tabela A12). Essa ordem de classificação também é observada para os coeficientes de curtose das disciplinas de projeto, ou seja, o cenário BR apresenta as curvas de distribuição de probabilidade de saída do Modelo de ACV mais próximas da normal.

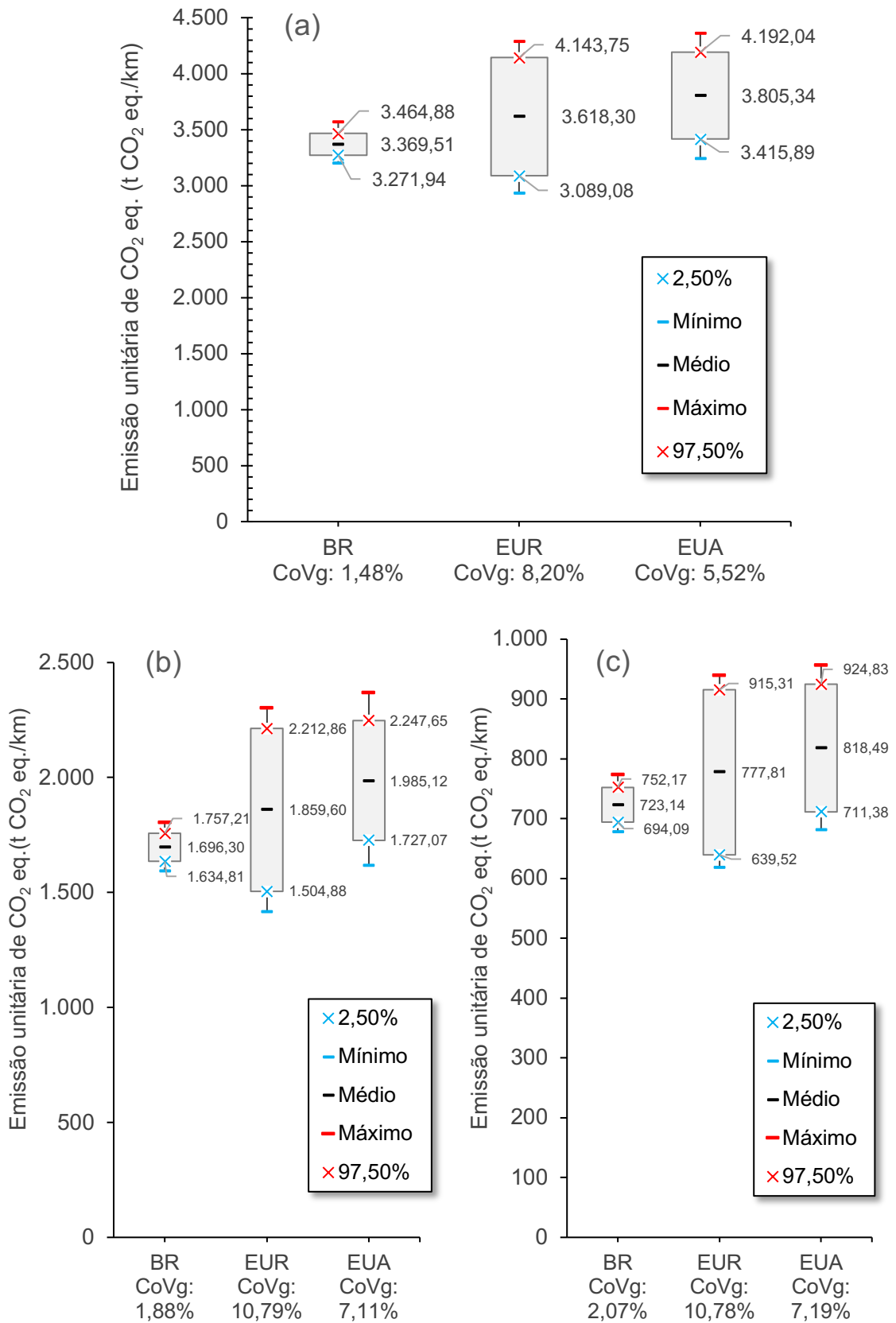
Ao comparar os resultados determinísticos de emissão unitária global de CO₂ eq. (Tabela 4.7) do projeto integral e suas disciplinas com os correspondentes valores médios da Tabela 4.8, observa-se que não há diferenças entre os resultados. Essa concordância entre os resultados determinísticos e probabilísticos era esperada, pois as FDPs de entrada do Modelo de ACV possuem extremos simétricos em relação ao seu valor médio, representado pelos fatores de emissão FEM, FEE e FEC, conforme descrito na seção 3.6 da metodologia.

Durante as simulações do MMC, observou-se que à medida que o número de iterações aumentava, as curvas de distribuição de probabilidade de saída do Modelo de ACV se aproximavam cada vez mais da distribuição normal. Os valores dos extremos do IC de 95%, representados na Tabela 4.8 como 2,5% (probabilidade acumulada mínima) e 97,5% (probabilidade acumulada máxima), assim como a média, apresentaram variações cada vez menores, atingindo valores praticamente estáveis para 20.000 iterações. Esses comportamentos refletem os princípios da Lei dos Grandes Números (seção 2.3.4.2) e do Teorema do Limite Central (2.3.4.3), utilizados pelo MMC.

Os valores médios de emissão de CO₂ eq. da Tabela 4.8, como mencionado anteriormente, não apresentam diferenças em relação aos seus correspondentes resultados determinísticos. O cenário BR registra os menores resultados, seguido pelos cenários EUR e EUA. No entanto, ao considerar o extremo superior do IC de 95%, essa ordem de classificação entre os cenários pode se alterar. Para melhor ilustrar esse comportamento, a Figura 4.7 traz uma representação gráfica dos resultados probabilísticos do projeto integral e das disciplinas de pavimento novo e restaurado.

Figura 4.7 – Resultados probabilísticos do Modelo de ACV dos cenários BR, EUR e EUA:

(a) projeto integral, (b) pavimento novo e (c) pavimento restaurado



Ao analisar os resultados da Figura 4.7 para a probabilidade acumulada máxima (ou seja, para aqueles valores da previsão cuja probabilidade acumulada de ocorrência é igual a 97,5%), observa-se que o cenário BR continua a ter as menores emissões unitárias de CO₂ eq. entre os cenários investigados. Contudo, ao comparar os cenários EUR e EUA, nota-se que nessa mesma probabilidade as diferenças relativas entre seus resultados são muito baixas, sendo 1,20% para o projeto integral (Figura 4.7.a), 1,60% para o pavimento novo (Figura 4.7.b) e 1,04% para o pavimento restaurado (Figura 4.7.c). Nesse contexto, apesar de os CoVg do cenário EUR serem maiores que os do cenário EUA, não é possível estabelecer uma diferença clara entre esses dois cenários na máxima probabilidade de ocorrência. Dito de outra forma, não é possível afirmar qual dos cenários (EUR e EUA) apresenta o menor valor de emissão global de CO₂ eq. quando adotado como parâmetro de comparação o valor do extremo superior do IC da curva de distribuição de probabilidade de saída do Modelo de ACV.

Os resultados do modelo de um sistema real podem assumir dois tipos de validade: global e aparente. Segundo Chung (2004), a validação dos resultados do modelo pode começar com o suporte de especialistas na área para confirmar que ele contempla os processos principais do sistema real. A segunda etapa envolve a análise estatística, comparando os dados do sistema real com as previsões do modelo. Após essas etapas, pode-se decidir se o modelo tem resultados com validade global. Chung (2004) também esclarece que a validação das previsões do modelo pode ser feita parcialmente, substituindo a segunda etapa mencionada pela variação dos dados de entrada mais representativos para o modelo e investigando como essa variação afeta os seus resultados. Quando as saídas têm comportamento consistente com os estímulos de entrada, pode-se considerar que o modelo tem resultados com uma validade aparente.

Embora os resultados do Modelo de ACV desta pesquisa não possam ser validados estatisticamente com base em um sistema real devido à falta de uma referência direta, observa-se na Tabela 4.8 que os valores previstos são consistentes com as diferenças nos valores do CoV e da carga ambiental dos cimentos dos cenários (Figura 4.1). Portanto, considerando também que o modelo desenvolvido reflete satisfatoriamente os processos principais do sistema real, uma vez que foi tomado como base para o seu desenvolvimento o projeto de engenharia do DNIT (DNIT, 2022a), é possível concluir que o Modelo de ACV desta pesquisa possui resultados com uma validade aparente.

4.3.2 Análise de sensibilidade dos resultados

Segundo o manual de usuário do *software* Crystal Ball (Oracle, 2015), a análise de sensibilidade da simulação do MMC mostra a influência de cada dado de entrada ou pressuposto do modelo nas previsões dos resultados, esclarecendo ainda que a influência de um pressuposto é uma combinação de dois fatores:

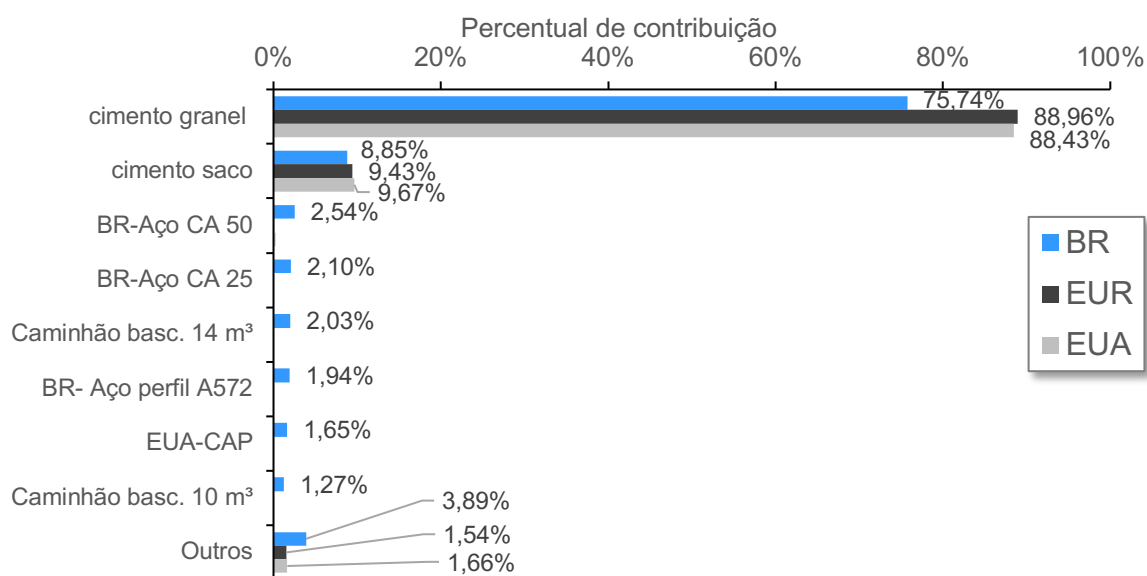
- a) valor do pressuposto (fator quantitativo): na presente pesquisa, este fator está associado ao valor obtido pela multiplicação dos fatores de emissão (FEM, FEE e FEC) de cada insumo por seu respectivo quantitativo de projeto. Quanto maior esse valor, maior é a influência direta do insumo nos resultados do modelo, e
- b) incerteza do pressuposto (fator qualitativo): representada pelo CoV associado a cada insumo do projeto. Quanto maior o CoV, maior é a capacidade do insumo influenciar a dispersão dos resultados do modelo, que nesta pesquisa é traduzida pelo CoVg.

Portanto, deve-se compreender que quanto maior a influência de um determinado insumo do projeto da BR-080/DF, maior a contribuição conjunta de seus parâmetros quantitativo e qualitativo para a mudança dos resultados. As próximas seções apresentam os gráficos de sensibilidade extraídos do *software* Crystal Ball para o Modelo de ACV do projeto integral e de suas disciplinas, categorizados pelos cenários BR, EUR e EUA.

4.3.2.1 Projeto integral

A Figura 4.8 contém os resultados de sensibilidade do Modelo de ACV do projeto integral.

Figura 4.8 – Sensibilidade do Modelo de ACV do projeto integral dos cenários ¹



Nota ¹ Os prefixos nos nomes dos materiais indicam o país de origem de seu FEM.

A Figura 4.8 mostra que para o projeto integral o insumo cimento responde pela maior influência nos resultados dos cenários, confirmando o que foi observado na seção 4.2.2. Contudo, pode-se notar que à medida que a influência do cimento gradualmente diminui, outros insumos ganham relevância. Isso é evidente no cenário BR, onde insumos como aço CA-50, aço CA 25 e o caminhão basculante 14 m³ começam a ter influência nos resultados, ainda que pequena. Nos cenários EUR e EUA, a influência desses insumos não é perceptível.

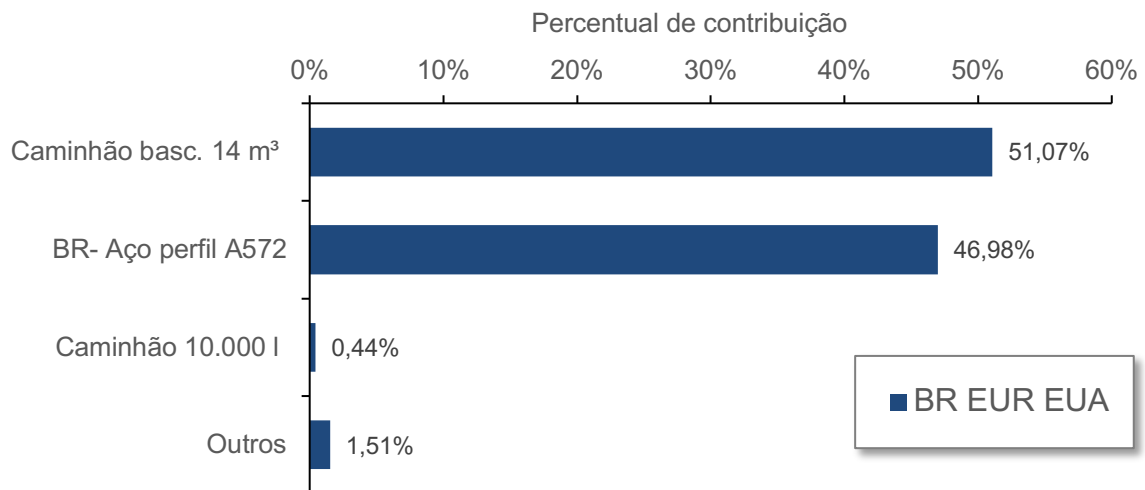
Os comportamentos observados na Figura 4.8 podem ser justificados. No cenário BR, o cimento tem o menor FEM (606 kg CO₂ eq./t) e o menor CoV (3,01%), o que resulta em sua menor influência nos resultados em comparação com os cimentos dos cenários EUA e EUR. Para estes dois cenários, a influência de seus cimentos nos resultados é equivalente. Isso pode ser explicado pela ação conjunta dos dois fatores que respondem pela influência dos dados de entrada nos resultados do Modelo de ACV, conforme esclarecido na introdução desta seção. Apesar de o cimento dos EUA ter um FEM maior (742 kg CO₂ eq./t) em comparação com o cimento europeu (683 kg CO₂ eq./t), este último possui um CoV mais alto (17,39%) em comparação ao CoV do cimento americano (11,15%). A combinação desses fatores (quantitativo e qualitativo) resulta na equivalência da influência dos cimentos americano e europeu nos resultados do Modelo de ACV do projeto integral.

Os resultados também indicam que a fase Transporte, com um predomínio dos caminhões basculantes, começa a desempenhar algum tipo de influência nos resultados do cenário BR. Embora seus percentuais sejam consideravelmente menores em comparação com o cimento, eles mostram que após a fase Material, a fase Transporte se torna significativa na emissão unitária de CO₂ eq. do projeto integral, corroborando a ordem observada nos resultados determinísticos e ilustrada na Figura 4.3 (seção 4.2.1).

4.3.2.2 Terraplanagem

A Figura 4.9 contém os resultados de sensibilidade do Modelo de ACV da disciplina de terraplanagem.

Figura 4.9 - Sensibilidade do Modelo de ACV da terraplanagem



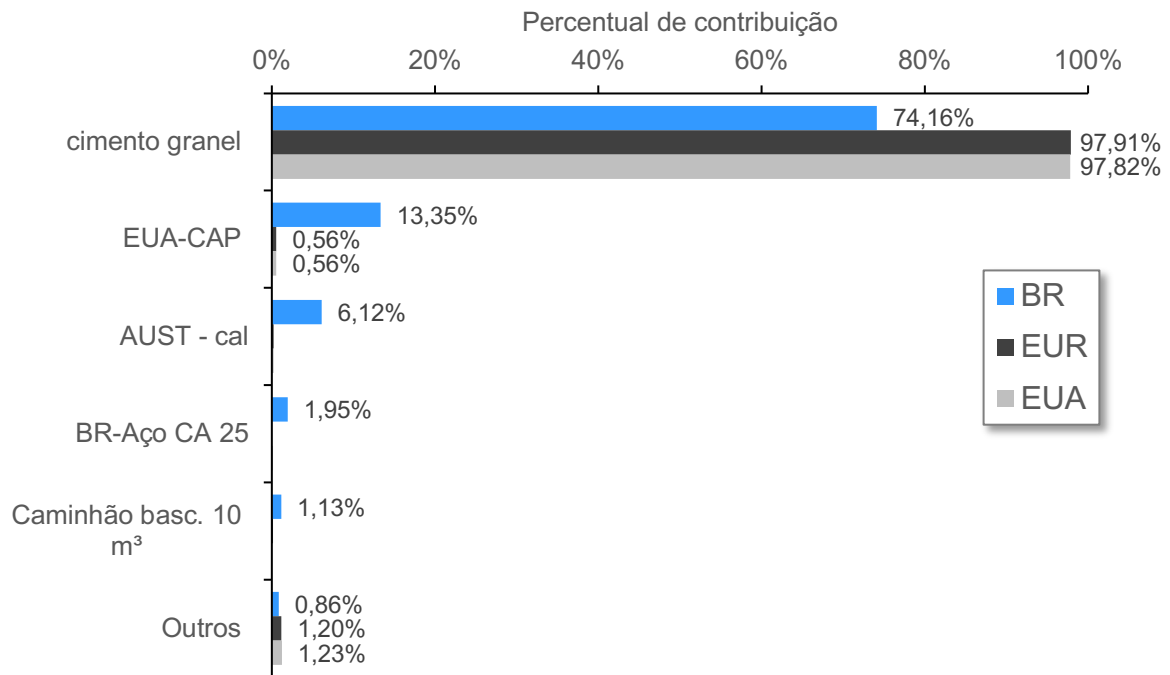
No que diz respeito ao modelo de ACV da disciplina de terraplanagem, o caminhão basculante 14 m³ é o que mais influencia os resultados, com uma sensibilidade de 51,07%. Na sequência, o perfil ASTM A572 responde pela segunda posição em termos de influência, com uma sensibilidade de 46,98%. Os demais insumos dessa disciplina apresentam uma influência muito baixa nos resultados.

Assim, em um contexto voltado à redução das emissões unitárias de CO₂ eq. da disciplina de terraplanagem, uma das opções é selecionar jazidas de empréstimos com menores DMTs, o que resultaria na redução da carga horária total operativa do caminhão basculante 14 m³ e, conseqüentemente, no consumo total de combustível por esse equipamento. A segunda alternativa, possivelmente mais viável em termos de projeto, é revisar a solução de engenharia que prevê a execução de aterros estaqueados com aço perfil ASTM A572, optando por uma alternativa equivalente que não utilize esse material.

4.3.2.3 Pavimento restaurado

A Figura 4.10 contém os resultados de sensibilidade do modelo de ACV da disciplina de pavimento restaurado para os três cenários de análise.

Figura 4.10 - Sensibilidade do Modelo de ACV do pavimento restaurado dos cenários ¹



Nota ¹ Os prefixos nos nomes dos materiais indicam o país de origem de seu FEM. (AUST – Austrália).

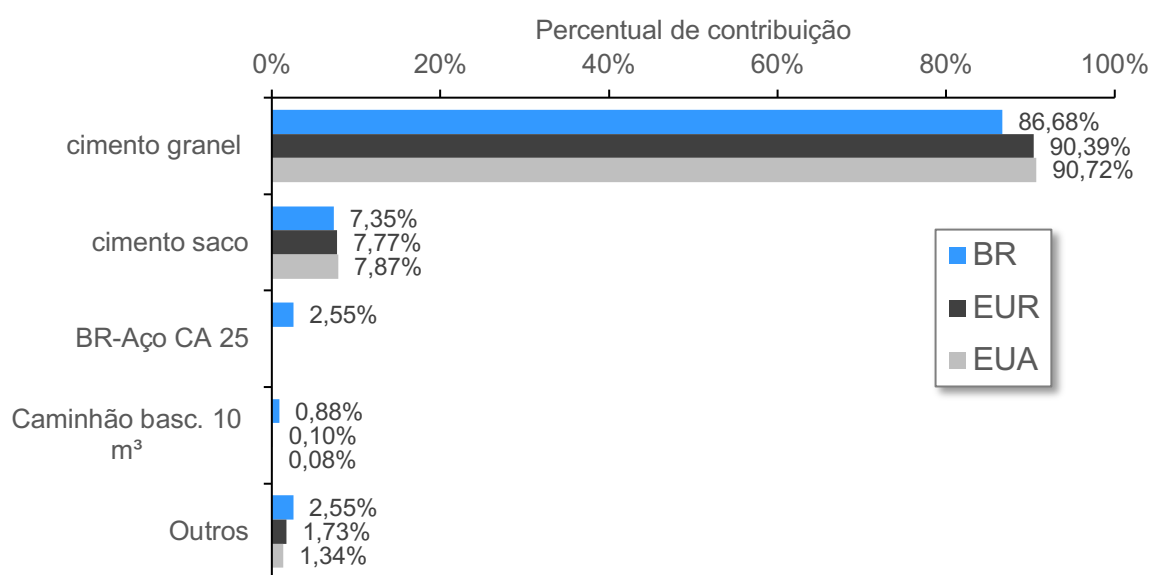
A Figura 4.10 mostra que o cimento exerce uma influência significativa nos resultados do Modelo de ACV do pavimento restaurado em todos os cenários. A diminuição progressiva da influência do cimento nos resultados é compensada pelo aumento da influência de outros insumos. Por exemplo, no cenário BR, há uma influência secundária do CAP, com uma contribuição de 13,55%, seguido pela cal com 6,12%. Os cimentos americano e europeu apresentam influências equivalentes e predominantes nos resultados de seus modelos.

Após a influência significativa dos materiais na sensibilidade dos resultados, observa-se novamente que a fase Transporte, representada pelo caminhão basculante 10 m³, começa a demonstrar sua influência à medida que a sensibilidade do cimento diminui.

4.3.2.4 Pavimento novo

A Figura 4.11 contém os resultados de sensibilidade do Modelo de ACV da disciplina de pavimento novo para os três cenários de análise.

Figura 4.11 - Sensibilidade do Modelo de ACV do pavimento novo dos cenários



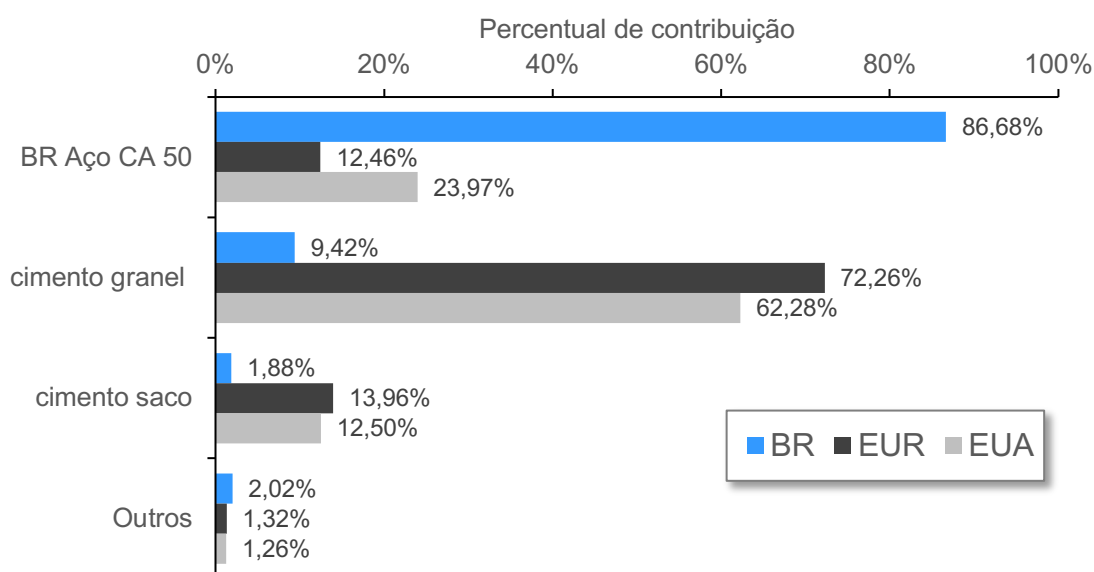
Os resultados indicam que o cimento é o insumo com maior impacto na emissão de CO₂ eq. do pavimento novo em todos os cenários. Nota-se, de maneira semelhante ao projeto integral e ao pavimento restaurado, que à medida que a influência do cimento diminui, outros insumos, como o aço CA-25 no cenário BR, ganham importância.

Percebe-se que para a disciplina de pavimento novo não há diferenças significativas entre as contribuições dos cimentos (granel e saco) dos cenários, ao contrário do que foi observado no pavimento restaurado (Figura 4.10), com contribuições variando entre 74,16% (cimento do cenário BR) e 97,91% (cimento do cenário EUR). Uma das razões para essa diferença de comportamento está nos quantitativos dos insumos que compõem os serviços dos dois pavimentos. Por exemplo, são previstas 52.410,80 t de cimento (saco e granel) e 20,43 t de CAP no pavimento novo, enquanto no pavimento restaurado são previstas 17.292,77 t de cimento (granel) e 1.947,98 t de CAP. Os mesmos insumos, mas combinados em quantidades diferentes, podem influenciar de forma distinta os resultados do Modelo de ACV. Além disso, deve-se considerar a influência conjunta das quantidades dos insumos e das incertezas de seus dados ambientais (CoV) nas simulações, o que também pode contribuir para as mencionadas diferenças de comportamento do cimento nos resultados.

4.3.2.5 Obra de Arte Especial

A Figura 4.12 contém os resultados de sensibilidade do Modelo de ACV da disciplina de Obra de Arte Especial para os três cenários de análise.

Figura 4.12 - Sensibilidade do Modelo de ACV da OAE dos cenários



Os resultados de sensibilidade do modelo de ACV da OAE evidenciam um comportamento que não segue o observado nas disciplinas anteriores, com o predomínio do aço CA-50 na variação dos resultados do cenário BR, e com o cimento na segunda posição. Mais uma vez, isso pode ser explicado pela ação conjunta dos dois fatores que afetam a influência dos insumos nos resultados probabilísticos do Modelo de ACV. Para facilitar a compressão, a Tabela 4.9 resume os parâmetros qualitativos e quantitativos do aço CA-50 e dos cimentos (granel e saco) utilizados na disciplina de OAE.

Tabela 4.9 – Propriedades dos cimentos e aço CA-50 da disciplina de OAE ¹

Insumo	Cenário BR		Cenário EUR		Cenário EUA	
	Quant. (t CO ₂ eq.)	Quali. CoV (%)	Quant. (t CO ₂ eq.)	Quali. CoV (%)	Quant. (t CO ₂ eq.)	Quali. CoV (%)
cimento (granel)	686,41	3,01	773,632	17,39	840,46	11,15
cimento (saco)	323,00		364,04		395,49	
aço CA-50	803,78	7,53	803,78	7,53	803,78	7,53

Nota ¹ Os valores de emissão total de CO₂ eq. foram obtidos multiplicando a quantidade do insumo (dado de engenharia) por seu respectivo FEM (dado ambiental), detalhados na seção de Apêndices.

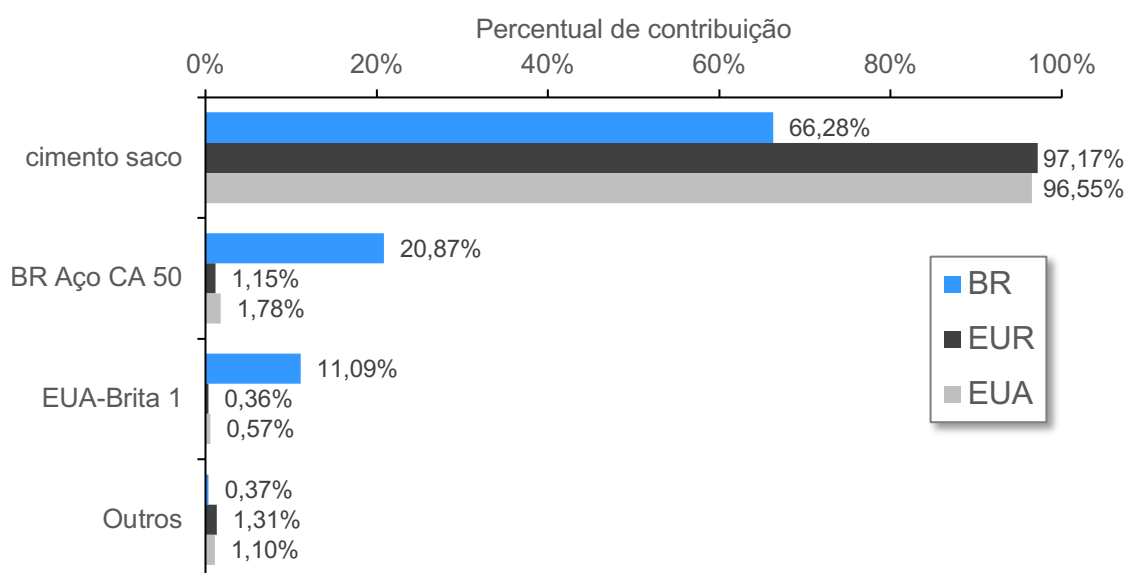
No cenário BR, percebe-se que os parâmetros qualitativo e quantitativo de cada cimento são inferiores aos do aço, o que explica a maior influência deste último nos resultados. Já nos cenários EUR e EUA, os cimentos apresentam emissões individuais mais elevadas em

relação ao cenário BR, sendo que no cenário EUA o cimento a granel supera a emissão do aço. Além disso, os CoVs dos cimentos europeu e americano são maiores que os do aço e do cimento brasileiro. Assim, a análise dos resultados indica que à medida que as emissões dos insumos cimento e aço se aproximam, o parâmetro qualitativo (CoV) se torna crítico a sensibilidade do Modelo de ACV da OAE. Isso explica a maior influência do cimento a granel dos cenários EUR e EUA frente aos demais insumos, além da diferença de comportamento com os resultados de sensibilidade do cenário BR.

4.3.2.6 Drenagem e OAC

A Figura 4.13 contém os resultados de sensibilidade do Modelo de ACV da disciplina de drenagem/OAC para os três cenários de análise.

Figura 4.13 - Sensibilidade do Modelo de ACV da drenagem/OAC dos cenários

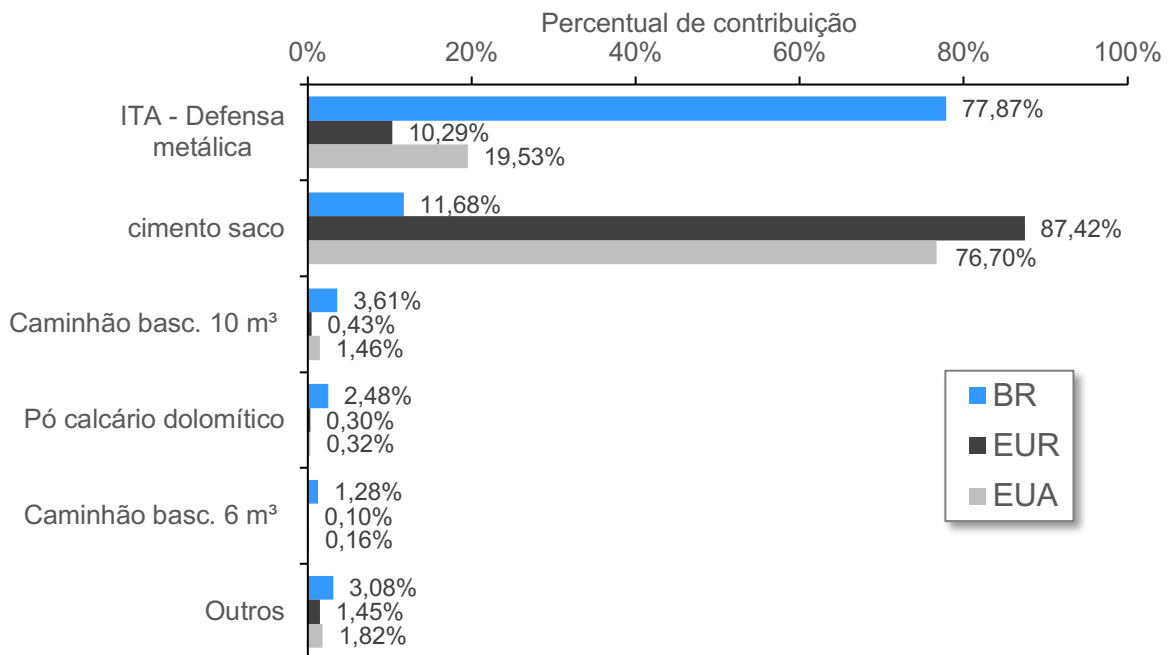


Os resultados de sensibilidade do Modelo de ACV da drenagem/OAC mostram que o cimento tem uma influência predominante nos resultados de todos os cenários. Conforme observado anteriormente, à medida que a sensibilidade do cimento diminui, outros insumos, como o aço CA-50 e a brita 1, começam a ganhar relevância nos resultados do modelo.

4.3.2.7 Demais serviços

A Figura 4.14 contém os resultados de sensibilidade do modelo de ACV da disciplina de demais serviços dos três cenários de análise.

Figura 4.14 - Sensibilidade do Modelo de ACV dos demais serviços dos cenários ¹



Nota ¹ Os prefixos nos nomes dos materiais indicam o país de origem de seu FEM. (ITA – Itália).

Os resultados indicam que a defesa metálica é o insumo com o maior potencial de impacto nos resultados do cenário BR, com o cimento em segunda posição em termos de relevância. Em contrapartida, para os cenários EUR e EUA, o cimento é o insumo com maior influência nos resultados. Os comportamentos destoantes entre estes dois últimos cenários e o cenário BR segue a mesma lógica descrita para o modelo da disciplina de OAE (seção 4.3.2.5). No cenário BR, os parâmetros quantitativos do cimento (com 1.712,20 t CO₂ eq.) e da defesa metálica (com 1.654,50 t CO₂ eq.) são próximos entre si. Por outro lado, o cimento brasileiro possui um CoV de 3,01%, ao passo que o CoV da defesa metálica o valor de 7,60%. Portanto, o parâmetro qualitativo se torna decisivo para a diferença de influência desses insumos nos resultados do cenário BR. Já para os cenários EUR e EUA, os parâmetros qualitativos e quantitativos dos cimentos são superiores aos correspondentes parâmetros da defesa metálica, explicando a maior influência do cimento frente aos demais insumos e, mais uma vez, a diferença de comportamento com o cenário BR.

Percebe-se também que após a terraplanagem (seção 4.3.2.2), é na disciplina de demais serviços que os caminhões apresentam as maiores contribuições: 3,61% para o caminhão basculante 10 m³ e 1,26% para o caminhão basculante 6 m³. Ou seja, após a disciplina de terraplanagem, é na disciplina de demais serviços que a fase Transporte possui a maior influência nos resultados. Essa constatação está em consonância com os resultados determinísticos apresentados na Figura 4.4 (seção 4.2.1).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa e as sugestões para futuros estudos. A pesquisa teve como objetivo geral estabelecer uma metodologia que combine os conceitos de ACV, técnicas de análise de incertezas e as normas do DNIT para avaliar as emissões de GEE, representadas em termos de CO₂ eq., dos projetos das rodovias federais brasileiras, considerando as fases de produção de material, transporte e obra. O Modelo de ACV desenvolvido foi aplicado a um projeto rodoviário do DNIT com solução em pavimento rígido de concreto e analisados os efeitos da variação dos dados ambientais do cimento *Portland* em seus resultados determinísticos e probabilísticos.

5.1 CONCLUSÕES

As conclusões desta pesquisa são apresentadas a seguir:

- Os resultados determinísticos mostraram que o cenário BR possui as menores emissões totais de CO₂ eq., tanto para o projeto integral quanto para suas disciplinas, seguido pelo cenário EUR e, por fim, o cenário EUA, que apresentou as maiores emissões. As variações nos resultados decorrem dos diferentes fatores de emissão de CO₂ eq. dos cimentos utilizados nos cenários. Em termos de disciplinas de projeto, as maiores diferenças relativas entre os resultados dos cenários foram encontradas nas disciplinas de pavimentação (novo e restaurado), o que foi influenciado pela maior proporção de cimento em suas composições de serviço;
- Observou-se que a fase Material teve a maior contribuição para a emissão total de CO₂ eq. do projeto integral, superior a 78% em todos os cenários, seguida pela fase Transporte com participações acima de 16%. Por outro lado, a fase Obra teve as menores contribuições nos resultados de todos os cenários analisados;
- Os resultados determinísticos dos três cenários revelaram que a fase Transporte, sendo a segunda maior fase de ACV em termos de contribuição para a emissão total de CO₂ eq. do projeto integral, também desempenha um papel importante nas emissões do projeto investigado. Isso sugere que essa fase não deve ser desconsiderada nas análises de ACV dos projetos rodoviários brasileiros. Além disso, as premissas conservadoras utilizadas nesta pesquisa para calcular as emissões dos equipamentos indicam que os resultados

das fases Transporte e Obra podem ser maiores, o que reforça ainda mais a relevância do transporte nesses estudos;

- Os resultados determinísticos das disciplinas de pavimentação, OAE, drenagem/OAC e demais serviços revelaram que a fase Material é a principal responsável por suas emissões totais nos três cenários analisados. Além disso, os resultados mostraram que as disciplinas de pavimento novo e restaurado são responsáveis por aproximadamente 81% das emissões totais de CO₂ eq. da fase Material, confirmando a relevância das disciplinas de pavimentação para os resultados do projeto analisado. A disciplina de terraplanagem também é afetada pela fase Material, embora de forma secundária e com valores que podem não refletir o observado em outros projetos rodoviários;
- Os resultados de emissão unitária de CO₂ eq. revelaram que a disciplina de pavimento novo apresentou os maiores valores em todos os cenários, seguida pelas disciplinas de pavimento restaurado e terraplanagem. As simulações mostraram que os resultados dessa última disciplina são fortemente influenciados pelas DMTs do projeto, o que pode levar a uma equivalência entre os resultados das disciplinas de terraplanagem e pavimento restaurado do cenário BR;
- Os resultados probabilísticos mostraram que a ordem de classificação dos cenários pode sofrer alteração em função da faixa de probabilidade assumida na análise. Se considerada a faixa intermediária (probabilidade acumulada de 50%), observou-se que os resultados determinísticos e probabilísticos do Modelo de ACV são iguais, portanto, evidenciando que o cenário BR seria a opção de escolha com as menores emissões globais de CO₂ eq., seguido pelos cenários EUR e EUA. Já para a situação com a máxima probabilidade de ocorrência (probabilidade acumulada de 97,5%), o cenário BR continuou a ser a alternativa com as menores emissões globais de CO₂ eq., mas não foi possível estabelecer uma distinção clara entre os cenários EUR e EUA, pois seus resultados foram semelhantes. A análise de sensibilidade dos resultados do projeto integral também não permitiu estabelecer uma distinção evidente entre esses dois últimos cenários, demonstrando assim que os dados ambientais dos cimentos europeu e americano têm uma influência similar nas estimativas de emissão global de CO₂ eq. obtidas a partir das simulações do MMC;

- A análise de sensibilidade dos resultados probabilísticos demonstrou como os parâmetros qualitativo e quantitativo dos insumos do projeto podem influenciar os resultados das simulações do MMC. Em todos os cenários, constatou-se que o cimento é um insumo crítico nos resultados do projeto integral e da maioria de suas disciplinas. Contudo, observou-se que a análise conjunta dos mencionados parâmetros pode alterar a ordem de criticidade dos insumos do projeto, fazendo com que o cimento deixe de ser o insumo com a maior influência nos resultados, a exemplo do que foi verificado para as disciplinas de OAE e demais serviços do cenário BR, e
- A diminuição gradual da influência do cimento nos resultados das simulações do MMC foi compensada pelo aumento da influência de outros insumos, com destaque aos ligados à fase Transporte, que, após a fase Material, mostrou-se a mais relevante para as emissões de CO₂ eq., corroborando o que foi observado nos resultados determinísticos.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o uso da ACV e técnicas de análise de incertezas permitiram estimar as emissões de GEE de um projeto rodoviário do DNIT com solução em pavimento rígido de concreto e avaliar os efeitos da variação dos dados ambientais do cimento *Portland* nos resultados. Notou-se ainda que a abordagem probabilística dos resultados, ao considerar a influência conjunta dos parâmetros qualitativos e quantitativos dos insumos do projeto nas previsões do Modelo de ACV desenvolvido, apresentou elementos que permitiram uma melhor compreensão das diferenças relativas entre os cenários investigados, indicando a fonte de dado ambiental para o cimento que levou às menores emissões globais e incertezas nos resultados do projeto selecionado.

Além disso, apesar de a pesquisa se concentrar no uso de dados ambientais do cimento *Portland* produzido no Brasil e no exterior, outros cenários poderiam ser elaborados com base apenas em fornecedores localizados na região de execução das obras do projeto, ou seja, sem variações nas pontuações do indicador de correlação geográfica desse material. Ainda assim, as diferenças na qualidade dos dados ambientais dos fornecedores locais de cimento poderiam ser determinadas a partir dos outros indicadores do Método IQDs (item 2.3.3; Tabela 2.8.), e as consequências nos resultados do Modelo de ACV novamente avaliadas.

Em relação ao Método IQDs, cabe destacar que ele não elimina por completo o emprego de um caráter subjetivo na atribuição das pontuações de seus indicadores, apesar das descrições

objetivas fornecidas pela Matriz Pedigree. Assim, os resultados da análise qualitativa dos dados ambientais desta pesquisa podem variar com o julgamento de diferentes especialistas em ACV.

Deve-se ressaltar também que devido à falta de um sistema real que reflita as condições atuais de execução do projeto selecionado, bem como ao pequeno número de estudos nacionais com escopo semelhante ao desta pesquisa, as previsões obtidas a partir do Modelo de ACV desenvolvido não foram integralmente validadas. Isso confere aos resultados deste estudo um caráter teórico. Além disso, os resultados desta pesquisa devem ser entendidos como referência de uma situação específica e não como sendo representativos de todos os projetos das rodovias federais brasileiras com solução em pavimento rígido de concreto.

A metodologia utilizada neste estudo para o desenvolvimento do Modelo de ACV, ao combinar conceitos da ACV, técnicas de análise de incertezas e as especificações normativas do DNIT, pode ser considerada uma ferramenta dinâmica e simplificada para estimar as emissões de GEE até a fase de construção dos projetos das rodovias federais brasileiras. Além disso, permite a análise de diferentes cenários a partir da variação das fontes de dados ambientais para insumos classificados como críticos para os resultados de cada situação específica de estudo.

Por fim, espera-se que as discussões presentes neste trabalho possam contribuir de forma geral para as ações voltadas à sustentabilidade no setor de transportes do Brasil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o uso da metodologia desta pesquisa em projetos de construção rodoviária com outras características e de diferentes localidades;
- Revisar e propor melhorias no modelo desenvolvido neste estudo e realizar a sua expansão para as demais fases do ciclo de vida de uma rodovia;
- Avaliar o desenvolvimento de uma Matriz Pedigree com novos indicadores e notas para os principais insumos rodoviários produzidos no Brasil;
- Investigar as incertezas associadas às emissões de CO₂ eq. pelos principais equipamentos usados nas fases de transporte, construção e manutenção das rodovias brasileiras, e

- Investigar a possibilidade de emprego de outras técnicas de análise de incertezas nos estudos de ACV dos projetos rodoviários brasileiros, aplicando essas diferentes técnicas em um estudo de caso e comparando os seus resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABED, A.; BIZZARRO, D. E. G.; NEVES, L.; PARRY, T.; KEIJER, E.; KALMAN, B. Uncertainty analysis of life cycle assessment of asphalt surfacings. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1–20, 21 abr. 2023.

ALAM, M. R.; HOSSAIN, K.; BAZAN, C. Life cycle analysis for asphalt pavement in Canadian context: modelling and application. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 8, p. 2606–2620, 2022.

ANASTASIOU, E. K.; LIAPIS, A.; PAPAYIANNI, I. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 101, p. 1–8, 1 jun. 2015.

ANTHONISSEN, J.; VAN DEN BERGH, W.; BRAET, J. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. **Environmental Impact Assessment Review**. Elsevier Inc., v. 60, p.139-147, 1 set. 2016.

ARAÚJO, J. P. C.; OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 32, p. 97–110, 2014.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Infometrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.

ARYAN, Y.; DIKSHIT, A. K.; SHINDE, A. M. A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures. **Journal of Environmental Management**. Academic Press, 15 jun. 2023.

ARYAN, Y.; KUMAR DIKSHIT, A.; MOHAN SHINDE, A. Assessment of environmental impacts and reduction opportunities for road infrastructures in India. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 128, 1 mar. 2024.

ASHTIANI, M. Z. et al. Greenhouse Gas Emissions Inventory from Roadway Construction: Case Study for the Washington State Department of Transportation. **Transportation Research Record**, 14 mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão ambiental avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 46 p.

ASTM INTERNATIONAL. **Environmental Product Declarations**. Disponível em: <https://www.astm.org/products-services/certification/environmental-product-declarations/epd-pcr.html>. Acesso em: 15 ago. 2023.

ATHENA, I.; CANADA, C. A. **Athena Pavement LCA**. Disponível em: https://calculatelca.com/wp-content/uploads/2016/04/PavementLCA_UserGuide.pdf. Acesso em: 14 ago. 2023.

AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; AMOR, B. Assessing the individual and combined effects of uncertainty and variability sources in comparative LCA of pavements. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 9, p. 1888–1902, 1 set. 2018.

AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, n. 9, p. 1888–1902, 1 set. 2018.

BAIOCHI, A. G.; SILVA, V. G. DA. Análise de incerteza de parâmetros com base em processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021027, 29 set. 2021.

BATOULI, M.; BIENVENU, M.; MOSTAFABI, A. Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 52, p. 289–302, 1 maio 2017.

BEGG, S. H.; WELSH, M. B.; BRATVOLD, R. B. **Uncertainty vs. variability: What's the difference and why is it important?** SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium. **Anais...Society of Petroleum Engineers (SPE)**, 2014.

BELIZARIO-SILVA, F. *et al.* **Sistema de informação ambiental da construção - Metodologia**. 1 ed., p. 1-74. São Paulo: SIDAC, 2022.

BELLO, A., LYRO, B., PAIVA, G., GONZALES, G., ARAÚJO, G., LIMA, H., SAMPAIO, L., GUIMARÃES, P., GUEDES, R., MORAES, T., TELLES, Y. **Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil**, v. 1, n.1, p. 1-108, fev. 2023, Brasil. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/programa-de-transicao-energetica> >. Acesso em: 20 maio 2024.

BERTHIAUME, R.; BOUCHARD, C. EXERGY ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF PAVING MATERIAL MANUFACTURE. **Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering**, v. 23, n. 1B, p. 187–196, 1999.

BOONPOKE, A.; SRIBUREE, J.; SEDPHO, S.; PRASERTSANG, T. Special Issue on: Green Technology for Sustainable Infrastructure Development Environmental impact

evaluation of road pavements using life cycle assessment tool. **International Association of Lowland Technology**, v. 20, n. 2, p. 117–124, 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Acordo de Paris**. Brasília-DF, Brasil, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf. Acesso em 9 nov. 2023.

BRASIL. **Plano Plurianual 2024-2027**: Mensagem presidencial/Ministério do Planejamento e Orçamento, Secretaria Nacional de Planejamento. Brasília-DF: Secretaria Nacional de Planejamento/MPO, 228 p, 2023a. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/plano-plurianual/arquivos/mensagem-presidencial-ppa-2024-2027/2_mensagem_presidencial_web-1-1.pdf. Acesso em: 22 abr. 2024.

BRASIL. Resolução nº 5, de 14 de setembro de 2023: Dispõe sobre a correção da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil ao Acordo de Paris visando restabelecer o nível de ambição da NDC apresentado em 2015, em termos dos valores absolutos das emissões de gases de efeito estufa - GEE. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ed. 204, seção 1, p. 24, 26 out. 2023b.

BRASIL. Casa Civil: **Novo Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC)**. Brasília-DF, Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac>. Acesso em: 13 mar. 2024.

BRESSI, S.; PRIMAVERA, M.; SANTOS, J. A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (RAP) materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, 1 maio 2022.

BUENO, C.; HAUSCHILD, M. Z.; ROSSIGNOLO, J. A.; OMETTO, A. R.; MENDES, N. C. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208–2220, 2016.

BUTT, A. A.; MIRZADEH, I.; TOLLER, S.; BIRGISSON, B. Life cycle assessment framework for asphalt pavements: Methods to calculate and allocate energy of binder and additives. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 15, n. 4, p. 290–302, 21 abr. 2014.

CANTER, K. G.; KENNEDY, D. J.; MONTGOMERY, D. C.; KEATS, J. B.; CARLYLE, W.C. Stochastic Modeling LCA Methodology Screening Stochastic Life Cycle Assessment Inventory Models. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 18–26, 2002.

CAO, R.; LENG, Z.; YU, H.; HSU, S. Comparative life cycle assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 147, p. 137–144, 1 ago. 2019.

CHAUDHARY, A.; AKHTAR, A. A Novel Approach for Environmental Impact Assessment of Road Construction Projects in India. **Environ Impact Assess Rev**, v.106, 26 fev. 2024.

CHEN, X.; WANG, H.; HORTON, R.; DEFLORIO, J. Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 91, 1 fev. 2021.

CHEN, X.; WANG, H. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 148–157, 20 jun. 2018.

CHEN, X.; WANG, H. Life-cycle assessment and multi-criteria performance evaluation of pervious concrete pavement with fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, 1 fev. 2022.

CHOI, K.; LEE, H. W.; MAO, Z.; LAVY, S.; RYOO, B. Y. Environmental, Economic, and Social Implications of Highway Concrete Rehabilitation Alternatives. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 2, fev. 2016.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. 1. ed. Florida: Editora CRC Press, p. 574, 2004.

CIROTH, A.; MULLER, S.; WEIDEMA, B. Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1338–1348, 1 set. 2016.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). **Indicators for the sustainability assessment of roads**. 1. ed., p. 1-35, 5 maio 2016. Disponível em: https://release.standard.no/Global/PDF/Samferdsele%20og%20transport/N_286_Indicators%20for%20the%20sustainability%20assessment%20of%20roads_CWA_H%C3%B8ringsfor%202016.pdf. Acesso em: 21 set. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2021**. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatórios-e-publicações/> ISBN 978-65-5577-048-3. Acesso em: 16 ago. 2023.

CONCRETE REINFORCED REINFORCING STEEL INSTITUTE (CRSI). **Environmental Product Declaration-Steel Reinforcement Bar**. p. 1-13, 20 set. 2022. Disponível em: <https://www.crsi.org/sustainability/environmental-product-declaration>. Acesso em: 18 set. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)**. Brasília-DF: DNIT, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt->

br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/relatorios-sicro/parametros-de-equipamentos/cadernos-tecnicos-de-parametros-de-equipamentos. Acesso em: 5 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Instrução de Serviço-220. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço.** 3. Ed. Rio de Janeiro: DNIT: 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/726_diretrizes_basicas-escopos_basicos-instrucoes_de_servico.pdf. Acesso em set. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes.** 1 ed. Brasília: DF: DNIT, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 20 out. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **EDITAL RDC ELETRÔNICO Nº 0484/22-00:** Contratação de empresa para execução das obras de adequação de capacidade, duplicação, restauração, melhorias de segurança e eliminação de pontos críticos na rodovia BR-080/DF. Brasília-DF: DNIT, 2022a. Disponível em: <https://www1.dnit.gov.br/editais/consulta/resumo.asp?NUMIDEdital=9291>. Acesso em: 21 jul. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório de parâmetros dos equipamentos do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO).** Brasília-DF: DNIT, 2022b. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/relatorio-de-parametros-de-equipamentos/janeiro-2021. Acesso em: 20 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **PNV/SNV: Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação.** Brasília-DF: DNIT, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>. Acesso em: 5 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **SUPRA – Supervisão Avançada.** Brasília-DF: DNIT, 2024b. Disponível em: <https://supra.dnit.gov.br/>. Acesso em 13 de mar. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **SICRO - Sistema de Custos Referencias de Obras:** Manuais de Custos. Brasília-DF: DNIT, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 6 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Coletânea de Normas do IPR**. Brasília-DF: DNIT, 2024d. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas>. Acesso em: 6 jan. 2024.

DIAZ-SARACHAGA, J. M.; JATO-ESPINO, D.; CASTRO-FRESNO, D. Methodology for the development of a new Sustainable Infrastructure Rating System for Developing Countries (SIRSDEC). **Environmental Science and Policy**, v. 69, p. 65–72, 1 mar. 2017.

DILGER, A.; RILEY, C.; YOUNG, S.; BENGTSSON, J.; KNEPPERS, B. **Greenhouse Gas Assessment Workbook for Road Projects**. 1. ed., p. 1-120, fev. 2013. Disponível em: <https://roads-waterways.transport.nsw.gov.au/documents/about/environment/greenhouse-gas-assessment-workbook-road-projects.pdf>. Acesso em: 18 set. 2023.

DONATO, M.; GOUVEIA, B. G.; MEDEIROS, A. S.; SILVA, M. A. V.; ODA, S. Mechanical Analysis of Subgrades of Road Pavements in Life Cycle Assessment. **Civil Engineering Journal (Iran)**, v. 8, n. 7, p. 1492–1506, 1 jul. 2022.

DUNN, W. L.; SHULTIS, J. K. **Praise for Exploring Monte Carlo Methods**. Amsterdam: Elsevier, 2010. v. 1, p. 1-392.

EDELEN, A.; INGWERSEN, W. **Guidance on Data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data**. EPA/600/R-16/096 ed. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2016. v. 1.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Informativo Técnico nº 011/2022**: Apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de GEE nos planos de energia, no BEN e demais produtos da EPE – Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/meio-ambiente/emissoes-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em 26 nov. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em 27 de nov. de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Inventário Nacional do Setor de Energia**: Período de jan./julho de 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2023b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em 25 de nov. 2023.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA (EPL). **Plano Nacional de Logística 2035**. Brasília-DF. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/copy_of_planejamento-de-transportes/pnl-2035>. Acesso em: 18 set. 2023.

ERIKSSON, E.; BLINGEB, M.; LIIVGREN, G. Life cycle assessment of the road transport sector. **The Science of the Total Environment**, v. 189, p. 69–76, 1996.

EUROBITUME. **THE EUROBITUME LIFE-CYCLE INVENTORY FOR BITUMEN**. 1. ed., p. 48, abril 2020. Belgium: Disponível em: <www.eurobitume.eu>. Acesso em: 21 ago. 2023.

EUROPEAN COMMISSION; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (EC-JRC). **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook**: Specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets. 1. ed., p. 1-142, mar. 2010. Luxembourg: Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>. Acesso em: 10 ago. 2023.

EUROPEAN STANDARD (EN). **EN 15804+A1**: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2013, 65 p.

EUROPEAN STANDARD (EN). **EN 15804+A2**: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2019, 71 p.

FARINA, A.; KUTAY, E.; ANCTIL, A. Mechanistic-empirical pavement design to include mechanical performance of rubberized asphalt pavements in the use stage of life cycle assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 206, 1 jul. 2024.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. Manual de Análise de Dados: Estatística e Modelagem Multivariada com Excel, SPSS e Stata. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Sustainability Analysis: Environmental**. Washington, DC: FHWA, 2023. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/environmental/>. Acesso em: 2 ago. 2023.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Towards Sustainable Pavement Systems. A Reference Document**. 1. ed., p. 1-458, jan. 2015. Washington, DC: FHWA, 2015. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/enstewardship.cfm>. Acesso em: 22 ago. 2023.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS (FBI). **Road & Highway Infrastructure Market Size**. 1 ed., p. 1-200, 2024. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/road-highway-infrastructure-market-107930>. Acesso em 17 set. 2024.

GOTA, S.; HUIZENGA, C.; PEET, K.; MEDIMOREC, N.; BAKKER, S. Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets. **Energy Efficiency**, v. 12, n. 2, p. 363–386, 14 fev. 2019.

GOUVEIA, B. G.; DONATO, M.; DA SILVA, M. A. V. Life Cycle Assessment in Road Pavement Infrastructures: A Review. **Civil Engineering Journal (Iran)**, v. 8, n. 6, p. 1304–1315, 2022.

- GRAEL, P. F. F.; OLIVEIRA, L. S. B. L.; OLIVEIRA, D. S. B.L.; BEZERRA, B. S. Life cycle inventory and impact assessment for an asphalt pavement road construction—a case study in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 2, p. 402–416, 1 fev. 2021a.
- GREGORY, J. R.; NOSHADRAVAN, A.; OLIVETTI, E. A.; KIRCHAIN, R. E. A Methodology for Robust Comparative Life Cycle Assessments Incorporating Uncertainty. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 12, p. 6397–6405, 21 jun. 2016.
- GROEN, E. A.; BOKKERS, E. A. M.; HEIJUNGS, R.; BOER, I. J. M. Methods for global sensitivity analysis in life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 7, p. 1125–1137, 1 jul. 2017.
- GUINÉE, J. B.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life cycle assessment: Past, present, and future. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 1, p. 90–96, 1 jan. 2011.
- HÄKKINEN, T.; MÄKELÄ, K. **Environmental adaption of concrete: environmental impact of concrete and asphalt pavements**. Technical Research Centre of Finland, v. 1, n.1, p. 95, 1996.
- HARVEY, J. T.; MEIJER, J.; OZER, H.; AL-QADI, I. L.; SABOORI, A. KENDALL, A. Pavement Life Cycle Assessment Framework. **Federal Highway Administration**, p. 1–244, jul. 2016.
- HARVEY, J. T.; BUTT, A. A.; ORG, E. **Recommended Approach for Use of Cradle-to-Gate Environmental Product Declarations (EPDs) in Procurement of Civil Infrastructure Materials**, v. 1, p. 1-30, abril 2023.
- HASAN, U.; WHYTE, A.; AL JASSMI, H. Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 541–558, 1 jan. 2019.
- HONG, F.; PROZZI, J. A. Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 8, p. 1816–1831, 17 nov. 2018.
- HONG, J.; SHEN, G. Q.; PENG, Y.; FENG, Y.; MAO, C. Uncertainty analysis for measuring greenhouse gas emissions in the building construction phase: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 183–195, 15 ago. 2016.
- HORA, K. M. DA. **Metodologia para avaliação do ciclo de vida de ciclovias de pavimento rígido**. 2021. 123 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2021.

HORVATH, A.; HENDRICKSON, C. Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research**, v. 1626, p. 105–113, 1998.

HUIJBREGTS, M. A. J. LCA Methodology Application of Uncertainty and Variability in LCA Part I: A General Framework for the Analysis of Uncertainty and Variability in Life Cycle Assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 273–280, 1998.

HUIJBREGTS, M. A. J.; WIM GILIJAMSE; LUCAS REIJNDERS. Evaluating Uncertainty in Environmental Life-Cycle Assessment. A Case Study Comparing Two Insulation Options for a Dutch One-Family Dwelling. **Environmental Science & Technology**, v. 3, n. 11, p. 2600–2608, 29 maio 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **SICV Brasil**: Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida. Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br/>. Acesso em: 3 ago. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON): **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 3. ed., v. 1, p. 217-290. São Paulo: Editora Arte Criativa, 2022

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - (INMETRO). **CONSULTA**: Lei de Acesso à Informação: processo nº 03005.187358/2023-81. INMETRO, 2023. Brasília, 12 jun. 2023. Formulário eletrônico - Plataforma SouGov.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Breakthrough Agenda Report 2023**, IEA, 2023, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>. Acesso em 10 maio 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2013. v. 5, p. 1-1585, 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 22 set. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero**: Orientación general y generación de informes: Incertidumbres. IPCC, 2006a. v. 1, cap. 3, p. 1-71. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol1.html>. Acesso em 12 dez. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero**: Energía. IPCC, 2006b. v 2, cap. 3, p. 1-78. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html>. Acesso em 12 dez. 2023.

INTERNATIONAL EPD®. **The International EDP System**. Disponível em: <https://environdec.com/library>. Acesso em: 15 ago. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14025**: Environmental Labels and Declarations-Type III Environmental Declarations-Principles and Procedures. International Standard. ISO: Geneva, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044**: Environmental Management -Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 21930**: Sustainability in building construction — Environmental declaration of building products. International Organization for Standardization. Genebra, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 14048**. Environmental management-Life cycle assessment-Data documentation format. International Organization for Standardization, 2020.

INTERNATIONAL TRANSPORTE FORUM (ITF). **The Innovative Mobility Landscape: The Case of Mobility as a Service A Summary Transport CO₂ and the Paris Climate Agreement: Where Are We Six Years Later?** ITF, 2021, v. 1, p. 1-8. Disponível em: <www.itf-oecd.org>. Acesso em: 21 maio 2024.

INYIM, P.; PEREYRA, J.; BIENVENU, M.; MOSTAFAVI, A. Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. **Journal of Environmental Management**, v. 176, p. 128–138, 1 jul. 2016.

JIANG, R.; WU, C.; SONG, Y.; WU, P. Estimating carbon emissions from road use, maintenance and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach – A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, 20 dez. 2020.

JIANG, R.; WU, P. Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 77, p. 148–163, 1 dez. 2019.

JULLIEN, A.; DAUVERGNE, M.; CERZO, V. Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 29, p. 56–65, 2014.

KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A. **Monte Carlo Methods**. Second ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2008. v. 1

KAWANO, A.; PAIVA, J. L. **Probabilidades: Um curso básico de reoferecimento**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2023. v. 1

KENDALL, A. **Life Cycle Assessment for Pavement: Introduction**. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_details.cfm?id=935. Acesso em: 16 ago. 2023.

KENNEDY, D. J.; MONTGOMERY, D. C.; QUAY, B. H. Stochastic Environmental Life Cycle Assessment: A Probabilistic Approach to Incorporating Variable Input Data Quality Modeling. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 199–207, 1996.

KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 17, n. 1, p. 86–90, 2012.

LEA, J.; HARVEY, J.; ORG, E. **Pavement Environmental Life Cycle Assessment Tool for Local Governments**. Relatório de Pesquisa UC-ITS-2020-44. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/1nm5c9gp>. Acesso em: 13 nov. 2023.

LI, D.; LENG, Z.; YAO, L.; CAO, R.; ZOU, F.; LI, G.; WANG, H. Mechanical, economic, and environmental assessment of recycling reclaimed asphalt rubber pavement using different rejuvenation schemes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 204, 1 maio 2024.

LIU, Y.; WANG, Y.; LI, D. Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 337–346, 15 fev. 2017.

LLOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 161–179, 2007.

LOIJOS, A.; SANTERO, N.; OCHSENDORF, J. Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 72, p. 76–83, 2013.

LUVIZÃO, G.; TRICHÊS, G. Case Study on Life Cycle Assessment Applied to Road Restoration Methods. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 8, 1 abr. 2023.

MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. **XXVI Congresso Internacional AEDEM**, p. 427–443, 4 jul. 2017.

MARK A.J. HUIJBREGTS *et al.* SETAC-Europe LCA Working Group “Data Availability and Data Quality”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 127–132, 2001.

MARTINHO, F. C. G.; SILVA, H. M. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; MOURA, C. F. N.; LOUREIRO, C. D. A.; SILVESTRE, J. D.; RODRIGUES, M. M. M. Mechanical and Environmental Performance of Asphalt Concrete with High Amounts of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Use in Surface Courses of Pavements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 1, 1 jan. 2024.

MASCARENHAS, Z. M. G.; PIOA, Z.; VASCONSELOS, K. L.; POULIKAKOS, L. D.; BERNUCCI, L. B. Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. **Science of the Total Environment**, p. 1–11, 30 out. 2022.

MATTINZIOLI, T.; SANCHEZ, M. S.; MARTÍNEZ, G.; GÁMEZ, M. R. A critical review of roadway sustainable rating systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 63, 1 dez. 2020.

MATTINZIOLI, T.; SANCHEZ, M. S.; MARTÍNEZ, G.; GÁMEZ, M. R. A parametric study on the impact of open-source inventory variability and uncertainty for the life cycle assessment of road bituminous pavements. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 5, p. 916–935, 1 maio 2021.

MAURICE, B.; FRISCHKNECHT, R.; COELHO-SCHWIRTZ, V.; HUNGERBUHLER, K. Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 8, p. 95–108, 2000.

MAY, J. R.; BRENNAN, D. J. Application of Data Quality Assessment Methods to an LCA of Electricity Generation. **Australian Electricity Generation**, v. 8, n. 4, p. 215–225, 19 jun. 2003.

MEIJER, J.; HARVEY, J.; BUTT, A.; KIM, C.; RAM, P. R.; SMITH, K.; SABOORI, A. **LCA Pave: A Tool to Assess Environmental Impacts of Pavement Material and Design Decisions: Underlying Methodology and Assumptions**. Washington, DC. p. 1-50, nov. 2021. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_details.cfm?id=935. Acesso em: 16 ago. 2023.

MELLO, L. G.; QUEIROZ, C. Recentes Investimentos em Rodovias Federais Brasileiras. **Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv)**, p. 20–34, 2017. Disponível em: <https://www.abpv.org.br>. Acesso em 13 set. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **COP 28: Brasil nos Emirados Árabes**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima>. Acesso em: 18 nov. 2023.

MINX, J. C.; LAMB, W. F.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G.; CRIPPA, M.; DOBBELING, N.; FORSTER, P. M.; GUIZZARDI, D.; OLIVIER, J.; PETERS, G. P.; PONGRATZ, J.; REISINGER, A.; RIGBY, M.; SAUNOIS, M.; SMITH, S. J.; SOLAZZO, E.; TIAN, H. A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national

greenhouse gas emissions by sector 1970-2018 with an extension to 2019. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 11, p. 5213–5252, 10 nov. 2021.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2015.

MORALES, M. F. D.; REGULY, N.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A. Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, 1 abr. 2020.

MROUEH, U.-M.; ESKOLA, P.; LAINE-YLIJOKI, J. Lifecycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. **Waste Management**, v. 21, n. 3, p. 271–277, 2001.

MUN, J. **Modeling Risk: applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization Techniques**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

NASCIMENTO, F.; GOUVEIA, B.; DIAS, F.; RIBEIRO, F.; SILVA, M. A. A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, 20 out. 2020.

NATALLI, J. F.; THOMAZ, E. C. S.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, vol. 14, no. 6, e14603, 2021.

NOSHADRAVAN, A.; WILDNAUER, M.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 25, p. 131–138, 2013.

ORACLE ENTERPRISE PERFORMANCE MANAGEMENT SYSTEM (ORACLE). **Crystal Ball User's Guide**, v 11.1.2, p. 440, 2015. Disponível em: <https://www.crystalballservices.com/Research/Crystal-Ball-User-Guides>. Acesso em: dez. 2023.

OSORTO, M. R. R.; CASAGRANDE, M. D. T. Environmental Impact Comparison Analysis between a Traditional Hot Mixed Asphalt (HMA) and with the Addition of Recycled Post-Consumer Polyethylene Terephthalate (RPET) through the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1102, 6 jan. 2023.

OSTOVAR, M. **Environmental and Social Life Cycle Assessment (LCA) in Transport Infrastructure**. 2023. 498p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade da Califórnia, Davis, 2023.

PEREIRA, A.; BLANC, I.; COSTE, J.-F. Contribution of life cycle assessment: global atmospheric emissions for motorway infrastructures. **International Journal of Vehicle Design**, v. 20, p. 1–4, 1998.

PILGER, J. D.; MACHADO, E. L.; RODRIGUES, A. A. L.; ZAPPE, A. L.; LOPEZ, D. A. R. Environmental impacts and cost overrun derived from adjustments of a road construction project setting. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, 20 maio 2020.

POTENZA, R. F.; QUINTANA; G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S.; SILVA, F. B.; GRACES, I.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970 - 2021)**, v. 1, p. 1-54, 2023, Brasil. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2021>>. Acesso em: 19 maio 2024.

PLATI, C.; TSAKOUMAKI, M. Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Pavement Rehabilitation Solutions: A Case Study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 3, 1 fev. 2023.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **INDUSTRY-AVERAGE ENVIRONMENT PRODUCT DECLARATION (EPD). PORTLAND CEMENT**. Disponível em: <www.astm.org>. Acesso em: 15 ago. 2023.

PRATICÒ, F. G. *et al.* Energy and environmental life cycle assessment of sustainable pavement materials and technologies for urban roads. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 2, 1 jan. 2020.

RANGELOV, M.; DYLLA, H.; MUKHERJEE, A.; SIVANESWARAN, N. Use of environmental product declarations (EPDs) of pavement materials in the United States of America (U.S.A.) to ensure environmental impact reductions. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 10 fev. 2021.

REID, L. *et al.* **INVEST - Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Too**. v. 3.1, p. 1-310, 2018, USA. Disponível em: <www.sustainablehighways.org>. Acesso em: 18 set. 2023.

RIBEIRO, F. B.; NASCIMENTO, F. A. C. DO; SILVA, M. A. V. DA. Environmental performance analysis of railway infrastructure using life cycle assessment: Selecting pavement projects based on global warming potential impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, 10 set. 2022.

ROCHA, C. G.; SALDANHA, R. B.; ARAÚJO, M. T.; CONSOLI, N. L. Social and environmental assessments of Eco-friendly Pavement alternatives. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 1–13, 10 fev. 2022

ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 634–642, 22 mar. 2017.

ROSENBAUM, R. K. **Interpretation: Uncertainty and sensitivity**. Material didático da disciplina Life Cycle Assessment of Products and Systems. Division of Quantitative Sustainability Assessment, DTU Management Engineering, Technical University of Denmark, 2012.

ROSS, S. **Probabilidade: Um curso moderno com aplicações**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, v. 1, 2010.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. **Resources, Conservation and Recycling**, jul. 2011a.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. **Resources, Conservation and Recycling**, jul. 2011b.

SANTOLINI, E.; TARSI, G.; TORREGGIANI, D.; SANGIORGI, C. Towards more sustainable infrastructures through circular processes: Environmental performance assessment of a case study pavement with recycled asphalt in a life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 448, 5 abr. 2024.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G.; CEREZO, V. A multi-objective optimization approach for sustainable pavement management. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 14, n. 7, p. 854–868, 3 jul. 2018a.

SANTOS, J.; BRESSI, S.; CEREZO, V.; PRESTI D. L.; DAUVERGNE, M. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 283–297, 1 nov. 2018b.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. A life cycle assessment model for pavement management: Methodology and computational framework. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 3, p. 268–286, 16 mar. 2015a.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. A life cycle assessment model for pavement management: Road pavement construction and management in Portugal. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 4, p. 315–336, 21 abr. 2015b.

SAVIETTO, J. P. **Análise de Impactos Ambientais da Restauração de Pavimentos Asfálticos pela Avaliação do Ciclo de Vida**. 2017. 110 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

SELVAM, M.; DEBBARMA, S.; SINGH, S.; SHI, X. Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements-A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 317, 23 nov. 2021.

SHI, X.; MUKHOPADHYAY, A.; ZOLLINGER, D; GRASLEY, Z. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 414–425, 10 jul. 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2022**, Brasília-DF. SNIC, 2022. Disponível em http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

SOBOL, I. M. **A primer for the Monte Carlo Method**. 4. ed. Florida: CRD Press Web, 1994.

SOUZA, L. P. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. 2017. 116 p. Dissertação (Mestrado – Departamento de Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

STRIPPLE, H. **Life Cycle Assessment of Road. A Pilot Study for Inventory Analysis**. 2 ed., p. 1-182, 2001. Gothenburg: Disponível em: <www.ivl.se>. Acesso em: 10 out. 2023.

SUPRAYOGA, G. B.; BAKKER, M.; WITTE, P.; SPIT, T. A systematic review of indicators to assess the sustainability of road infrastructure projects. **European Transport Research Review**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2020.

TOLLER, S. **Klimatkalkyl-Calculating greenhouse gas emissions and energy use of transport infrastructure from a life cycle perspective**. v. 5/6, p. 1-32, 2018. Disponível em:https://bransch.trafikverket.se/contentassets/eb8e472550374d7b91a4032918687069/klimatkalky_report_v_5_0_and_6.0_english.pdf. Acesso em: 16 ago. 2023.

TRAFIKVERKET, 2023. Administração de Transportes da Suécia. **Cálculo climático: O impacto climático e o uso de energia da infraestrutura em uma perspectiva de ciclo de vida**. Disponível em: <https://bransch.trafikverket.se/klimatkalkyl>. Acesso em: 18 jul. 2023.

TRELOAR, G. J.; PETER E.D., L.; CRAWFORD, R. H. Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 130, n. 1, p. 43–49, 2004.

UMER, A.; HEWAGE, K.; HAIDER, H.; SADIQ, R. Sustainability evaluation framework for pavement technologies: An integrated life cycle economic and environmental trade-off analysis. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 53, p. 88–101, 1 jun. 2017.

VIGON, B. *et al.* Review of LCA datasets in three emerging economies: a summary of learnings. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 11, p. 1658–1665, 1 nov. 2017.

WANG, E.; SHEN, Z. A hybrid Data Quality Indicator and statistical method for improving uncertainty analysis in LCA of complex system-application to the whole-building embodied energy analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 43, p. 166–173, 2013.

WANG, T.; LEE, I. S.; KENDALL, A.; HARVEY, J.; LEE, E. B.; KIM, C. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. **Journal of Cleaner Production**, v. 33, p. 86–96, set. 2012.

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 1, p. 167–174, 1996.

WEIDEMA B P *et al.* **Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.** p. 1-169, 6 maio 2013. Swiss: Disponível em: ecoinvent.org/wp-content/uploads/2021/09/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf. Acesso em: 5 jul. 2023.

WEIDEMA, B. P. LCA Data Quality. Multi-User Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 5, p. 259–265, 1998.

WORLD BANK GROUP (WBG). **Plan de acción sobre el cambio climático 2021-25.** 1. ed., p. 1-61, 2021. Washington, DC: WBG, 2021. Disponível em: www.worldbank.org. Acesso em: 12 jul. 2023.

WORLD BANK GROUP (WBG). **Transport - Greenhouse Gas Emission Mitigation in Road Construction and Rehabilitation: A Toolkit for Developing Countries.** 1. Ed., p. 1-78. Washington, DC: WBG, 2011. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/660861468234281955/pdf/696590ESW0P1010UBLIC00GHG0Web0final.pdf>. Acesso em 20 jul. 2023.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.** 1. ed., v. 1, p. 1-300, 20 mar. 1987. Oslo: Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em 10 ago. 2023.

XU, X.; AKBARIAN, M.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. Role of the use phase and pavement-vehicle interaction in comparative pavement life cycle assessment as a function of context. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 1156–1164, 1 set. 2019.

YOO, W.; OZER, H.; HAM, Y. System-Level Approach for Identifying Main Uncertainty Sources in Pavement Construction Life-Cycle Assessment for Quantifying Environmental Impacts. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 145, n. 2, fev. 2019.

- YU, B.; LIU, Q.; GU, X. Data quality and uncertainty assessment methodology for pavement LCA. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 6, p. 519–525, 3 jun. 2018.
- YU, B.; LU, Q. Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 306–309, 1 fev. 2014.
- YU, B.; LU, Q. Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 17, n. 5, p. 380–388, 2012.
- YU, B.; LU, Q.; XU, J. An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 55, p. 1–11, 2013.
- YU, B.; WANG, S.; GU, X. Estimation and uncertainty analysis of energy consumption and CO₂ emission of asphalt pavement maintenance. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 326–333, 10 jul. 2018.
- ZHANG, H.; LEPECH, M. D.; KEOLEIAN, G. A.; QIAN, S.; LI, V. C. Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration. **JOURNAL OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS**, p. 1–11, 2010.
- ZHENG, X.; EASA, S. M.; YANG, Z.; JI, T.; JIANG, Z. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 659–672, 10 mar. 2019.
- ZHONG, T.; ZHENG, Y.; CHEN, Z.; YAO, L.; ZHANG, W.; ZHU, Y.; FU, L. Utilization of steel slag as coarse aggregate and filler in stone mastic asphalt (SMA) mixture: Engineering performance, environmental impact and economic benefits analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, 15 abr. 2024.
- ZIYADI, M.; OZER, H.; KANG, S.; AL-QADI, I. L. Vehicle energy consumption and an environmental impact calculation model for the transportation infrastructure systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 424–436, 20 jan. 2018.
- ZIYADI, M.; AL-QADI, I. L. Model uncertainty analysis using data analytics for life-cycle assessment (LCA) applications. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 5, p. 945–959, 1 maio 2019.

APÊNDICES

Tabela A1 – Relação de materiais do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (MATERIAIS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
1	M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	M	t	58.185,12	-	17.292,77	39.759,66	1.132,70	-	-
2	M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	M	t	20.541,96	-	-	12.651,14	533,01	4.532,40	2.825,41
3	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	M	t	2.029,54	-	1.947,98	20,43	-	-	61,13
4	M0003	Aço CA 25	M	t	1.368,05	-	412,06	946,20	9,78	-	-
5	M0191	Brita 1	M	t	263.026,49	-	32.704,30	128.619,32	2.995,30	95.691,60	3.015,97
6	M0946	Aço em perfis ASTM A572 grau 50	M	t	683,91	683,91	-	-	-	-	-
7	M0004	Aço CA 50	M	t	1.394,47	-	167,00	383,47	436,83	351,08	56,08
8	M0082	Areia média lavada	M	t	60.286,00	-	-	32.069,84	3.635,45	14.510,11	10.070,60
9	M0192	Brita 2	M	t	142.169,76	-	27.977,23	86.046,46	398,84	21.469,11	6.278,12
10	M1968	Defensa metálica semimaleável simples	M	m	18.822,56	-	-	-	-	-	18.822,56
11	M0028	Areia média	M	t	107.283,11	-	43.286,75	63.596,24	-	-	400,11
12	M1135	Pó de pedra	M	t	106.628,42	-	8.934,93	97.693,49	-	-	-
13	COTA001	Brita Graduada Simples (BGS)	M	t	115.777,01	-	91.271,11	24.505,90	-	-	-
14	M0005	Brita 0	M	t	59.073,80	-	4.352,36	50.196,62	-	-	4.524,82
15	M1941	Óleo tipo A1	M	l	294.237,08	-	282.674,30	2.749,99	-	-	8.812,80
16	M0999	Tela em aço CA 60 soldada nervurada	M	t	134,84	-	134,84	-	-	-	-

Continua

Tabela A1 – Relação de materiais do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (MATERIAIS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
17	M2152	Aditivo de cura para concreto	M	t	162,86	-	49,41	113,45	-	-	-
18	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	M	t	356,38	-	132,60	223,78	-	-	-
19	M0030	Aditivo plastificante e retardador de pega para concreto	M	t	179,13	-	43,97	113,66	5,18	12,62	3,69
20	M0344	Cal hidratada - a granel	M	t	994,12	-	918,50	18,47	-	-	57,15
21	M0103	Aditivo acelerador de pega para concreto projetado	M	t	74,46	-	-	-	-	-	74,46
22	M0427	Cordoalha nua tipo CP 190 RB - D = 12,7 mm	M	t	32,09	-	-	-	32,09	-	-
23	M2092	Emulsão asfáltica para imprimação	M	t	61,47	-	61,47	-	-	-	-
24	M0081	Areia grossa	M	t	1.506,15	1.506,15	-	-	-	-	-
25	M1103	Pedrisco	M	t	6.951,61	-	6.694,68	64,64	0,03	-	192,26
26	M0615	Aditivo incorporador de ar para concreto e argamassa	M	t	39,00	-	14,33	24,67	-	-	-
27	M0014	Aço CA 60	M	t	26,84	-	-	-	-	6,99	19,86
28	M1378	Chapa grossa em aço ASTM A36	M	t	15,72	-	-	-	15,72	-	-
29	M1755	Pó calcário dolomítico	M	t	209,95	-	-	-	1,56	1,85	206,54
30	M2979	Chumbador em aço CA 25	M	t	3,91	-	-	-	-	-	3,91
31	M2426	Cordoalha engraxada tipo CP 190 RB - D = 12,7 mm	M	t	1,02	-	-	-	1,02	-	-
32	M0682	Aço em perfis ASTM A36	M	t	0,12	-	-	-	-	-	0,12

M: Material

Conclusão

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
1	E9667	Caminhão basculante com capacidade de 14 m ³ - 188 kW	T	h	86.197,57	86.197,57	-	-	-	-	-
2	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	T	h	76.509,36	46,04	20.361,93	40.960,99	475,73	-	14.664,67
3	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW	T	h	22.287,25	-	6.302,68	-	-	-	15.984,57
4	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	T	h	7.916,43	7.180,81	143,01	565,09	-	-	27,52
5	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW	T	h	8.405,42	7,70	1.060,60	4.635,52	746,92	-	1.954,68
6	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	O	h	5.511,76	5.502,59	-	-	-	-	9,17
7	E9145	Caminhão basculante para concreto: 7 m ³ - 188 kW	T	h	5.722,18	-	1.206,43	4.515,75	-	-	-
8	E9685	Rolo compactador pé de carneiro de 11,6 t - 82 kW	O	h	8.381,28	7.834,93	-	521,21	-	-	25,13
9	E9686	Caminhão carroceria com guindauto capac. 20 t.m - 136 kW	T	h	4.839,01	-	-	-	-	1.139,64	3.699,37
10	E9044	Central de concreto com capacidade de 150 m ³ /h - dosadora e misturadora	M	h	2.348,81	-	396,85	1.905,17	20,46	12,29	14,05
11	E9524	Motoniveladora - 93 kW	O	h	3.963,47	2.869,54	491,55	370,06	-	85,44	146,87
12	E9600	Caminhão betoneira com capacidade de 8 m ³ - 188 kW	T	h	4.157,25	-	-	3.648,47	-	-	508,77

T: Transporte, O: Obra e M: Material

Continua

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
14	E9645	Caminhão demarcador de faixas com sistema de pintura a quente - 5 kW/30,10 kW/136 kW	O	h	2.457,92	-	-	-	-	-	2.457,92
15	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kW	O	h	2.225,41	-	428,60	1.796,81	-	-	-
16	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m³ - 265 kW	T	h	2.290,83	-	713,31	1.531,70	43,62	-	2,20
17	E9792	Caminhão para hidrossemeadura com capacidade de 7.500 l - 136 kW	T	h	2.682,37	-	-	-	-	-	2.682,37
18	E9588	Vibroacabadora de concreto sobre esteiras com fôrmas deslizantes - 205 kW	O	h	896,48	-	329,39	567,09	-	-	-
19	E9778	Grupo gerador - 310/340 kVA	M	h	2.348,81	-	396,85	1.905,17	20,46	12,29	14,05
20	E9502	Bate-estaca de gravidade para 6 t - 119 kW	O	h	3.051,81	3.051,81	-	-	-	-	-
21	E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	O	h	4.004,35	3.606,21	-	359,63	-	21,16	17,34
22	E9575	Caminhão basculante com caçamba estanque com capacidade de 14 m³ - 188 kW	T	h	2.360,96	2.360,96	-	-	-	-	-
23	E9155	Caldeira de asfalto rebocável com capacidade de 600 l - 5,20 kW	M	h	859,67	-	-	-	-	-	859,67
24	E9541	Trator sobre esteiras com lâmina - 259 kW	O	h	816,95	816,95	-	-	-	-	-
25	E9632	Conjunto vibratório para tubos de concreto 2,20 kW	O	h	40.077,74	-	-	-	-	40.077,74	-

Continuação

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
26	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	O	h	1.913,38	-	1.039,52	626,56	30,70	40,97	175,64
27	E9642	Perfuratriz hidráulica sobre esteiras para estaca raiz - 56 kW	O	h	1.615,07	-	-	-	1.615,07	-	-
28	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	M	h	358,86	-	344,35	3,45	-	-	11,06
29	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	O	h	1.154,02	-	337,59	805,59	-	-	10,84
30	E9526	Retroescavadeira de pneus com capacidade de 0,76 m³ - 58 kW	O	h	2.414,13	-	-	-	-	683,50	1.730,63
31	E9576	Escavadeira hidráulica de longo alcance sobre esteiras - 103 kW	O	h	1.204,57	1.204,57	-	-	-	-	-
32	E9519	Betoneira com motor a gasolina com capacidade de 600 l - 10 kW	M	h	6.085,22	-	-	-	251,17	3.670,71	2.163,34
33	E9652	Compressor de ar portátil de 540,85 l/s - 331,10 kW	O	h	642,57	-	-	-	642,57	-	-
34	E9647	Compactador manual com soquete vibratório - 4,10 kW	O	h	18.995,99	-	-	-	-	5.013,47	13.982,52
35	E9671	Compressor de ar portátil de 363,87 l/s (771 PCM) - 158,13 kW	O	h	1.223,96	-	-	-	-	-	1.223,96
36	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	O	h	1.076,52	-	477,95	566,73	-	-	31,83
37	E9521	Grupo gerador - 2,5/3 kVA	O	h	58.316,03	-	-	-	10.672,29	47.643,74	-
38	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório de 10,4 t - 82 kW	O	h	777,84	-	276,83	492,12	-	-	8,89

Continuação

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
39	E9082	Bate-estaca hidráulico para defensas montado em caminhão guindauto com capacidade de 20 t.m e carroceria de 4 t - 136 kW	O	h	570,72	-	-	-	-	-	570,72
40	E9066	Grupo gerador - 13/14 kVA	O	h	10.338,83	-	-	-	1.056,31	6.309,45	2.973,07
41	E9589	Máquina texturizadora e aplicadora de cura química em pavimento de concreto - 44,80 kW	O	h	777,67	-	285,73	491,93	-	-	-
42	E9535	Serra circular com bancada - D = 30 cm - 4 kW	O	h	8.354,02	-	-	-	676,99	6.309,45	1.367,58
43	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW	T	h	980,04	-	-	-	-	-	980,04
44	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	M	h	358,86	-	344,35	3,45	-	-	11,06
45	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	T	h	573,49	-	241,97	331,52	-	-	-
46	E9514	Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido - 130 kW	O	h	464,98	-	366,56	98,42	-	-	-
47	E9094	Guindaste móvel sobre pneus com 6 eixos com capacidade máxima de 350 t - 450 kW	O	h	42,41	-	-	-	42,41	-	-
48	E9556	Compactador manual de placa vibratória - 3,00 kW	O	h	5.109,97	-	-	-	-	811,64	4.298,33
49	E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	O	h	4.278,82	-	1.345,84	2.932,98	-	-	-

Continuação

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
50	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	M	h	1.864,71	-	1.172,63	669,95	-	-	22,12
51	E9041	Caminhão carroceria com guindauto 45 t.m - 188 kW	O	h	239,84	55,77	-	-	176,54	-	7,53
52	E9069	Vibrador de imersão para concreto - 4,10 kW	O	h	8.589,20	-	-	8.551,11	-	38,09	-
53	E9631	Bomba para concreto projetado via seca com capacidade de 6 m³/h - 7,5 kW	O	h	1.223,96	-	-	-	-	-	1.223,96
54	E9530	Rolo compactador liso vibratório autopropelido por pneus de 11 t - 97 kW	O	h	347,27	-	190,61	51,18	-	105,48	-
55	E9690	Caminhão carroceria com guindauto - 136 kW	O	h	218,38	-	-	-	-	-	218,38
56	E9646	Compressor de ar portátil de 58,52 l/s (124 PCM) - 27 kW	O	h	812,98	-	255,71	557,27	-	-	-
57	E9008	Transportador manual de tubos de concreto com capacidade de 1 t	O	h	20.188,21	-	-	-	5.336,46	20.188,21	- 5.336,46
58	E9678	Fresadora a frio - 410 kW	O	h	33,41	-	33,41	-	-	-	-
59	E9518	Grade de 24 discos rebocável de D = 60 cm (24")	O	h	3.983,18	3.606,21	-	359,63	-	-	17,34
60	E9644	Caminhão demarcador de faixas - 28 kW/115 kW	O	h	94,62	-	-	-	-	-	94,62
61	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	M	h	358,86	-	344,35	3,45	-	-	11,06
62	E9774	Retroescavadeira de pneus 58 kW	O	h	190,62	-	-	-	-	190,62	-

Continuação

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
63	E9779	Grupo gerador - 100/110 kVA	O	h	262,64	-	-	-	262,64	-	-
64	E9071	Transportador manual carrinho de mão com capacidade de 80 l	O	h	23.892,08	-	-	-	1.456,37	13.397,91	9.037,80
65	E9064	Transportador manual gerica com capacidade de 180 l	O	h	5.819,25	-	-	-	288,79	4.462,26	1.068,20
66	E9103	Extrusora para meio-fio de concreto - 10,44 kW	O	h	374,62	-	-	-	-	374,62	-
67	E9503	Guilhotina hidráulica 16 x 6.100 mm - 30 kW	O	h	77,83	-	-	-	77,83	-	-
68	E9763	Grupo gerador - 36/40 kVA	O	h	263,57	-	-	-	261,06	-	2,51
69	E9540	Trator sobre esteiras com lâmina - 127 kW	O	h	37,64	-	-	-	-	-	37,64
70	E9010	Balança plataforma	O	h	5.770,08	-	-	-	184,13	3.385,58	2.200,37
71	E9697	Minicarregadeira de pneus com vassoura de 1,8 m - 45,50 kW	O	h	55,47	-	55,47	-	-	-	-
72	E9694	Misturador de argamassa de alta turbulência com capacidade de 220 l - 13 kW	M	h	262,64	-	-	-	262,64	-	-
73	E9771	Retroescavadeira de pneus com caçamba de escavação trapezoidal ou triangular - 58 kW	O	h	44,69	-	-	-	-	44,69	-
74	E9729	Equipamento para pintura eletrostática com cabine simples de 5,50 kW	O	h	247,82	-	-	-	247,82	-	-
75	E9760	Perfuratriz manual para coroa diamantada - 1,60 kW	O	h	1.396,88	-	-	-	1.396,88	-	-

Continuação

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
76	E9052	Empilhadeira a diesel com capacidade de 10 t - 82 kW	O	h	8,17	-	-	-	-	-	8,17
77	E9772	Retroescavadeira de pneus com caçamba de escavação - 58 kW	O	h	17,93	-	-	-	-	17,93	-
78	E9076	Equipamento para pintura eletrostática	O	h	54,54	-	-	-	-	-	54,54
79	E9634	Conjunto vibratório para tubos de concreto com encaixe PB e 3 jogos de fôrmas - D = 0,40 m - 2,20 kW	O	h	149,34	-	-	-	-	149,34	-
80	E9722	Conjunto bomba e macaco hidráulico para protensão 5 kW	O	h	47,71	-	-	-	47,71	-	-
81	E9507	Plotadora de recorte com computador e programa computacional	O	h	113,33	-	-	-	-	-	113,33
82	E9623	Máquina de bancada guilhotina - 4,00 kW	O	h	74,35	-	-	-	-	-	74,35
83	E9622	Máquina de bancada universal para corte de chapa - 1,50 kW	O	h	178,45	-	-	-	-	-	178,45
84	E9750	Bomba de injeção de argamassa com capacidade de 50 l/min	O	h	166,48	-	-	-	166,48	-	-
85	E9144	Pórtico metálico rolante com talha com capacidade de 5 t - 10 kW	M	h	17,38	-	-	-	-	-	17,38
86	E9675	Martelete perfurador/rompedor elétrico - 1,50 kW	O	h	812,67	-	-	-	172,19	-	640,49
87	E9703	Fábrica de pré-moldado de concreto para mourão - 2,20 kW	M	h	143,75	-	-	-	-	-	143,75
88	E9156	Soprador de ar costal - 2,6 kW	O	h	66,83	-	66,83	-	-	-	-
89	E9024	Misturador de nata cimento - 1,50 kW	O	h	19,92	-	-	-	19,92	-	-

Continuação

Tabela A2 - Relação de equipamentos do inventário segundo fase ACV, projeto integral e disciplina (FASE 1 – dados de engenharia)

Id.	Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und	Quantidade (EQUIPAMENTOS)						
					Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restaura.	Pav. Novo	OAE	Drenagem OAC	Demais serviços
90	E9011	Carro manual modelo plataforma de 200 x 80 cm com capacidade de 800 kg	O	h	287,49	-	-	-	-	-	287,49
91	E9720	Conjunto bomba e macaco hidráulico para protensão com capacidade de 250 kN - 3,70 kW	O	h	3,86	-	-	-	3,86	-	-
92	E9050	Guindaste móvel com 2 eixos com capacidade 18 t - 75 kW	O	h	0,48	-	-	-	0,48	-	-
93	E9026	Bomba para injeção de nata de cimento com capacidade de 2 MPa - 2,20 kW	O	h	19,92	-	-	-	19,92	-	-
94	E9719	Talha manual com capacidade de 3 t	O	h	191,46	-	-	-	47,71	-	143,75
95	E9570	Furadeira com base magnética - 1,20 kW	O	h	60,01	-	-	-	60,01	-	-
96	E9662	Equipamento para solda e corte com oxiacetileno	O	h	24,06	-	-	-	9,25	-	14,82
97	E9547	Máquina de solda elétrica transformadora 250 A - 9,20 kW	O	h	185,74	-	-	-	183,23	-	2,51
98	E9643	Equipamento para pintura a ar comprimido de pistola com caneca com capacidade de 1.000 ml e compressor de 1,50 kW	O	h	27,28	-	-	-	-	-	27,28
99	E9568	Furadeira de impacto de 12,5 mm - 0,80 kW	O	h	55,77	-	-	-	-	-	55,77
100	E9717	Máquina policorte - 2,20 kW	O	h	25,26	-	-	-	24,99	-	0,27
101	E9788	Misturador de argamassa com capacidade de 0,250 m ³ - 3,70 kW	M	h	0,04	-	-	-	0,04	-	-

Conclusão.

Tabela A3 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Declarante	Nome comercial do produto	Escopo geográfico		Tipo de declaração	Normas consideradas						
		País	Local da produção		ISO 14040	ISO 14044	ISO 14025	ISO 21930	EN 15804 +A1:2013	EN 15804 +A2:2019	Outras
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Barra reforçada Gerdau GG 50	Brasil	Divinópolis-MG	EPD	x	x	x	x		x	PCR 2019:14 version 1.11
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Barra reforçada Gerdau CA 60	Brasil	Recife-PE	EPD	x	x	x	x		x	PCR 2019:14 version 1.11
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Perfis laminados Gerdau	Brasil	Ouro Branco-MG	EPD	x	x	x	x		x	PCR 2019:14 version 1.11
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Chapas de aço Gerdau	Brasil	Ouro Branco-MG	EPD	x	x	x	x		x	PCR 2019:14 version 1.11
TYCSA PSC - GRUPO CELSA	Alambre pretensado PF4 (UME-EM 15804)	Espanha	Cantabria	EPD	x	x	x	x		x	
ASPHALT INSTITUTE	CAP (sem aditivos)	EUA Canadá	Nacional (EUA/Can.)	Genérico	x	x				x	
SPHERA SOLUTIONS	EMULSÃO (40% bitumen, 60% water)	Alemanha	Nacional (Ale.)	Genérico	x	x				x	
SPHERA SOLUTIONS	IMPRIMAÇÃO (60% bitumen, 23% solvent, 17% water)	Alemanha	Nacional (Ale.)	Genérico	x	x				x	
CEMBERAU	CEM II	França Alemanha Itália Polônia Espanha Reino Unido Turquia	Diversos	EPD	x	x	x			x	

Continua

Tabela A3 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Declarante	Nome comercial do produto	Escopo geográfico		Tipo de declaração	Normas consideradas						Outras
		País	Local da produção		ÃO 14040	ISO 14044	ISO 14025	ISO 21930	EN 15804 +A1:2013	EN 15804 +A2:2019	
PCA	Blended cement types (IP, IS, IL, IT)	EUA	Diversos	EPD	x	x	x	x			ASTM PCRs
VOTORANTIM CIMENTOS	CP II F 32	Brasil	Distrito Federal	Específico	x	x			x	x	EN 16908:2017
ADBRI	Hidróxido de cálcio	Austrália	Diversos	EPD	x	x	x			x	Product Category Rules (PCR) 2019:14, v1.11
VULCAN MATERIALS COMP.	Brita 0 e Pedrisco	EUA	Diversos	EPD	x	x	x	x			
VULCAN MATERIALS COMP.	Brita 1	EUA	Diversos	EPD	x	x	x	x			
VULCAN MATERIALS COMP.	Brita 2	EUA	Diversos	EPD	x	x	x	x			
VULCAN MATERIALS COMP.	BGS	EUA	Diversos	EPD	x	x	x	x			
VULCAN MATERIALS COMP.	Areia natural	EUA	Irwindale-CA	EPD	x	x	x	x			
VULCAN MATERIALS COMP.	Pó de pedra	EUA	Pleasanton-CA	EPD	x	x	x	x			
MARCEGAGLIA	Defensa metálica H2SPT_W4_2013-1	Itália	Pozzolo Formigaro	EPD	x	x	x			x	

Continuação

Tabela A3 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Declarante	Nome comercial do produto	Escopo geográfico		Tipo de declaração	Normas consideradas						
		País	Local da produção		ISO 14040	ISO 14044	ISO 14025	ISO 21930	EN 15804 +A1:2013	EN 15804 +A2:2019	Outras
STRIPPLE (2001)	Óleo combustível	SUÉCIA	Nacional (Sue.)	Genérico	x	x					
EFCA	Aditivo incorporador de ar	Europa	Diversos	EPD	x	x	x			x	
EFCA	Acelerador de pega	Europa	Diversos	EPD	x	x	x			x	
EFCA	Plastificante e superplastificante	Europa	Diversos	EPD	x	x	x			x	
EFCA	Retardador de pega	Europa	Diversos	EPD	x	x	x			x	

Conclusão

Tabela A4 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2

Declarante	Nome comercial do produto	Tipo do dado: genérico Vs específico			Período de ref. do Inventário	Validade da declaração	Und. Funcional	Metodologia de Impacto	Total (A1-A3)
		A1 Extração de matéria-prima	A2 Transportes até a fábrica	A3 Manufatura					
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Barra reforçada Gerdau GG 50	específico >90%	específico >90%	específico >90%	2019	31/03/2028	ton.	CML 2001/IPCC 2013	1.840,00
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Barra reforçada Gerdau CA 60	específico >90%	específico >90%	específico >90%	2019	31/03/2028	ton.	CML 2001/IPCC 2013	973,00
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Perfis laminados Gerdau	específico >90%	específico >90%	específico >90%	2019	27/04/2028	ton.	CML 2001/IPCC 2013	3.330,00
GERDAU ACOS LONGOS S.A.	Chapas de aço Gerdau	específico >90%	específico >90%	específico >90%	2019	27/04/2028	ton.	CML 2001/IPCC 2013	3.360,00
TYCSA PSC - GRUPO CELSA	Alambre pretensado PF4 (UME-EM 15804)	específico >90%	específico >90%	específico >90%	2022	21/09/2027	ton.	IPCC 2013	574,00
ASPHALT INSTITUTE	CAP (sem aditivos)	genérico	genérico	genérico	2012-2016	N.I.	ton.	IPCC 2013	637,00
SPHERA SOLUTIONS	EMULSÃO (40% bitumen, 60% water)	genérico	genérico	genérico	2022	2024	ton.	IPCC 2013	356,30
SPHERA SOLUTIONS	IMPRIMAÇÃO (60% bitumen, 23% solvent, 17% water)	genérico	genérico	genérico	2022	2024	ton.	IPCC 2013	667,80
CEMBERAU	CEM II	genérico	genérico	genérico	2016	24/02/2025	ton.	CML 2001/IPCC 2013	683,00

Continua

Tabela A4 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2

Declarante	Nome comercial do produto	Tipo do dado: genérico Vs específico			Período de ref. do Inventário	Validade da declaração	Und. Funcional	Metodologia de Impacto GWP (100 anos)	Total (A1-A3)
		A1 Extração de matéria-prima	A2 Transportes até a fábrica	A3 Manufatura					FEM (kg CO ₂ eq./und.func)
PCA	Blended cement types (IP, IS, IL, IT)	genérico	genérico	genérico	2019	03/12/2021	ton.	TRACI/IPCC 2013	742,00
VOTORANTIM CIMENTOS	CP II F 32	específico	específico	específico	2022-2023	2028	ton.	IPCC 2013	606,00
ADBRI	Hidróxido de cálcio	específico	específico	específico	2021-2022	2027	ton.	IPCC 2013	1.400,00
VULCAN MATERIALS COMP.	Brita 0 e Pedrisco	específico	específico	específico	2020	22/05/2025	ton.	TRACI/IPCC 2013	5,08
VULCAN MATERIALS COMP.	Brita 1	específico	específico	específico	2020	22/05/2025	ton.	TRACI/IPCC 2013	4,89
VULCAN MATERIALS COMP.	Brita 2	específico	específico	específico	2020	22/05/2025	ton.	TRACI/IPCC 2013	4,88
VULCAN MATERIALS COMP.	BGS	específico	específico	específico	2020	22/05/2025	ton.	TRACI/IPCC 2013	4,98
VULCAN MATERIALS COMP.	Areia natural	específico	específico	específico	2020	22/05/2025	ton.	TRACI/IPCC 2013	3,63
VULCAN MATERIALS COMP.	Pó de pedra	específico	específico	específico	2017	16/10/2022	ton.	TRACI/IPCC 2013	5,72
MARCEGAGLIA	Defensa metálica H2SPT_W4_2013-1	específico >90%	específico >90%	específico >90%	2021	20/12/2024	metro	IPCC 2013	87,9

Continuação

Tabela A4 – Parâmetros dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2

Declarante	Nome comercial do produto	Tipo do dado: genérico Vs específico			Período de ref. do Inventário	Validade da declaração	Und. Funcional	Metodologia de Impacto GWP (100 anos)	Total (A1-A3)
		A1 Extração de matéria-prima	A2 Transportes até a fábrica	A3 Manufatura					FEM (kg CO ₂ eq./und.func)
STRIPPLE (2001)	Óleo combustível	genérico	genérico	genérico	2001	N.I	litros	IPCC 2013	0,16
EFCA	Aditivo incorporador de ar	específico	específico	específico	2020	15/12/2026	ton.	IPCC 2013	439,00
EFCA	Acelerador de pega	específico	específico	específico	2020	15/12/2026	ton.	IPCC 2013	1.790,00
EFCA	Plastificante e superplastificante	específico	específico	específico	2020	16/12/2026	ton.	IPCC 2013	1.530,00
EFCA	Retardador de pega	específico	específico	específico	2020	16/12/2026	ton.	IPCC 2013	1.230,00
Conclusão									

Tabela A5 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Nome comercial do produto	IQDs	IQD médio adotado	FDP Beta – CO ₂ eq				Comentários
			α	β	Intervalo (+)	Intervalo (-)	
Barra reforçada Gerdau GG 50	5, 5, 4, 3, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Barra reforçada Gerdau CA 60	5, 5, 4, 3, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Perfis laminados Gerdau	5, 5, 4, 3, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Chapas de aço Gerdau	5, 5, 4, 3, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Alambre pretensado PF4 (UME-EM 15804)	4, 5, 5, 2, 2	3,5	2,0	2,00	0,25	-0,25	Notas atribuídas com base nas notas informadas na própria declaração. Foram realizadas ponderações nos indicadores de correlação tecnológica e geográfica com a finalidade de contemplar potenciais diferenças com os processos produtivos do Brasil.
CAP (sem aditivos)	4, 5, 3, 2, 3	3,5	2,0	2,00	0,25	-0,25	Foram utilizados majoritariamente dados primários no estudo, sendo que os dados de segundo plano são provenientes da base de dados GaBi, considerada como de elevado nível de precisão para o contexto dos EUA. Os dados dos processos do inventário são classificados como de elevado nível de completeza. A representatividade técnica, para o contexto em que o estudo foi realizado, é classificada como boa.
EMULSÃO (40% bitumen, 60% water)	3, 3, 5, 2, 3	3,0	1,0	1,00	0,30	-0,30	A margem de incerteza da declaração ambiental é de 30%, relativamente alta se comparada às demais fontes consultadas. Foram utilizados dados genéricos e representativos da Alemanha.

Continua

Tabela A5 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Nome comercial do produto	IQDs	IQD adotado	FDP Beta - CO ₂ eq.				Comentários
			α	β	Intervalo (+)	Intervalo (-)	
IMPRIMAÇÃO (60% bitumen, 23% solvent, 17% water)	3, 3, 5, 2, 3	3,0	1,0	1,00	0,30	-0,30	A margem de incerteza da declaração ambiental é de 30%, relativamente alta se comparada às demais fontes consultadas. Foram utilizados dados genéricos e representativos da Alemanha.
CEM II	4, 4, 3, 2, 2	3,0	1,0	1,00	0,30	-0,30	Foram utilizados dados médios de produção de cimento de países 7 países que integram a CEMBRAU relativos ao ano de 2016. Os dados foram avaliados por uma fonte independente. Além disso, foram empregados dados secundários provenientes da base de dados GaBi. Os dados médios utilizados para o desenvolvimento da EPD representam 74% da produção dos países membros da CEMBREAU (percentual relativo ao ano de 2016).
Blended cement types (IP, IS, IL, IT)	5, 4, 4, 2, 2	3,5	2,0	2,00	0,25	-0,25	Dados médios relativos ao ano de 2019 de 22 plantas dos EUA e que representam 80% do total de produção do tipo de cimento no país.
CP II F 32	4, 5, 5, 5, 5	5,0	5,0	5,00	0,10	-0,10	Dados baseados em medidas de planta industrial localizada no Distrito Federal, região do empreendimento em estudo. Os dados consideram o ano de operação compreendido por 08/2022 – 08/2023.
Hidróxido de cálcio	5, 5, 5, 2, 3	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Estudo com dados primários das plantas industriais e dados de segundo plano secundários, mas de bases de dados associadas à Austrália.
Brita 0 e Pedrisco	5, 5, 4, 2, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Brita 1	5, 5, 4, 2, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Brita 2	5, 5, 4, 2, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.

Continuação

Tabela A5 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Nome comercial do produto	IQDs	IQD adotado	FDP Beta - CO ₂ eq.				Comentários
			α	β	Intervalo (+)	Intervalo (-)	
BGS	5, 5, 4, 2, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Areia natural	5, 5, 4, 2, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Pó de pedra	5, 5, 3, 2, 4	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Os dados associados ao fator de emissão de CO ₂ são representativos para o local inventariado e os resultados foram verificados por uma fonte independente.
Defensa metálica H2SPT_W4_2013-1	5, 5, 5, 2, 3	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Foram empregados dados primários acima de 90% e dados da base da Ecoinvent associados à regional de fabricação do produto.
Óleo combustível	3, 2, 1, 1, 3	2,0	1,0	1,00	0,40	-0,40	Os dados do estudo são relativos à Suécia. Contudo, em consulta a outras referências, constatou-se que os fatores declarados possuem baixa oscilação entre as diferentes fontes bibliográficas, o que torna o dado representativo.
Aditivo incorporador de ar	5, 5, 4, 2, 3	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Foi considerado que é o mesmo produto comercializado no Brasil, mas eventualmente produzido sob condições distintas. Além disso, como não há detalhes sobre as condições de produção, foi atribuída uma nota conservadora ao indicador de correlação geográfica.

Continuação

Tabela A5 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 1

Nome comercial do produto	IQDs	IQD adotado	FDP Beta - CO ₂ eq.				Comentários
			α	β	Intervalo (+)	Intervalo (-)	
Acelerador de pega	5, 5, 4, 2, 3	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Foi considerado que é o mesmo produto comercializado no Brasil, mas eventualmente produzido sob condições distintas. Além disso, como não há detalhes sobre as condições de produção, foi atribuída uma nota conservadora ao indicador de correlação geográfica.
Plastificante e superplastificante	5, 5, 4, 2, 3	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Foi considerado que é o mesmo produto comercializado no Brasil, mas eventualmente produzido sob condições distintas. Além disso, como não há detalhes sobre as condições de produção, foi atribuída uma nota conservadora ao indicador de correlação geográfica.
Retardador de pega	5, 5, 4, 2, 3	4,0	3,0	3,00	0,20	-0,20	Foi considerado que é o mesmo produto comercializado no Brasil, mas eventualmente produzido sob condições distintas. Além disso, como não há detalhes sobre as condições de produção, foi atribuída uma nota conservadora ao indicador de correlação geográfica.

Conclusão.

Tabela A6 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2

Nome comercial do produto	Resultados da Simulação Monte Carlo (kg CO ₂ eq./und. funcional)						Declarações ambientais disponíveis em:
	Média	Mediana	Desvio padrão	CoV	2,50%	97,50%	
Barra reforçada Gerdau GG 50	1.841,81	1.841,67	138,75	7,534%	1.585,76	2.099,63	www.epdbrasil.com.br
Barra reforçada Gerdau CA 60	973,46	972,39	74,05	7,606%	835,61	1.111,22	www.epdbrasil.com.br
Perfis laminados Gerdau	3.331,80	3.333,91	253,30	7,603%	2.857,01	3.797,53	www.epdbrasil.com.br
Chapas de aço Gerdau	3.357,02	3.354,45	255,33	7,606%	2.881,22	3.834,44	www.epdbrasil.com.br
Alambre pretensado PF4 (UME-EM 15804)	573,84	573,89	64,67	11,270%	457,31	691,75	https://portal.environdec.com/
CAP (sem aditivos)	636,30	636,33	71,46	11,231%	507,45	764,30	https://www.asphaltinstitute.org/
EMULSÃO (40% bitumen, 60% water)	356,58	355,28	62,19	17,440%	254,97	457,75	https://www.oekobaudat.de/en.html
IMPRIMAÇÃO (60% bitumen, 23% solvent, 17% water)	666,72	666,69	115,74	17,359%	476,78	857,40	https://www.oekobaudat.de/en.html
CEM II	684,68	685,84	119,10	17,394%	489,04	877,14	https://www.cembureau.eu/
Blended cement types (IP, IS, IL, IT)	742,84	743,52	82,82	11,149%	591,84	891,71	https://mitsubishicement.com/wp-content/uploads/pca_epds_2021.pdf
CP II F 32	606,02	606,11	18,25	3,012%	571,09	641,05	Declaração não disponível publicamente, obtida diretamente junto à Votorantim Cimentos

Continua

Tabela A6 - Resultados da análise qualitativa dos dados ambientais dos materiais (FASE 2 – dados ambientais) – PARTE 2

Nome comercial do produto	Resultados da Simulação Monte Carlo (kg CO ₂ eq./und. funcional)						Declarações ambientais disponíveis em:
	Média	Mediana	Desvio padrão	CoV	2,50%	97,50%	
Hidróxido de cálcio	1.401,57	1.401,38	105,70	7,541%	1.201,03	1.600,25	https://portal.environdec.com/
Brita 0 e Pedrisco	5,08	5,08	0,38	7,495%	4,38	5,80	https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/536.EPD_for_VMC_Corona_Stone.pdf
Brita 1	4,89	4,89	0,37	7,558%	4,20	5,59	https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/536.EPD_for_VMC_Corona_Stone.pdf
Brita 2	4,88	4,88	0,37	7,533%	4,20	5,57	https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/536.EPD_for_VMC_Corona_Stone.pdf
BGS	4,98	4,98	0,37	7,516%	4,28	5,67	https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/536.EPD_for_VMC_Corona_Stone.pdf
Areia natural	3,63	3,63	0,28	7,577%	3,12	4,14	https://pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com/537.EPD_for_VMC_Durbin_Sand_Gravel.pdf
Pó de pedra	5,71	5,71	0,43	7,502%	4,91	6,53	371.EPD for VMC EPDPleasanton final.pdf (pcr-epd.s3.us-east-2.amazonaws.com)
Defensa metálica H2SPT_W4_2013-1	87,87	87,78	6,68	7,602%	75,47	100,43	https://portal.environdec.com/
Óleo combustível	0,16	0,16	0,04	22,898%	0,10	0,22	https://portal.environdec.com/
Aditivo incorporador de ar	438,79	438,78	33,21	7,569%	376,57	501,08	https://www.efca.info/efca-publications/environmental/
Acelerador de pega	1.788,52	1.786,19	134,77	7,535%	1.535,76	2.039,67	https://www.efca.info/efca-publications/environmental/
Plastificante e superplastificante	1.530,74	1.531,11	114,64	7,490%	1.316,16	1.747,56	https://www.efca.info/efca-publications/environmental/
Retardador de pega	1.230,21	1.229,11	93,26	7,581%	1.054,87	1.406,19	https://www.efca.info/efca-publications/environmental/

Conclusão

Tabela A7 - Emissão total dos materiais (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id.	Fase ACV	Fonte de dado ambiental		FEM (kg CO ₂ eq./und)	Emissão total (kg CO ₂ eq.) ¹						
		País Região	Local da produção		Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drena. OAC	Demais serviços
Cenário BR											
1	M	Brasil	Distrito Federal	606,00	35.260.184,69	-	10.479.418,69	24.094.351,49	686.414,51	-	-
2	M	Brasil	Distrito Federal	606,00	12.448.425,66	-	-	7.666.588,82	323.003,30	2.746.635,60	1.712.197,93
Cenário EUR											
1	M	Europa	Diversos	683,00	39.740.439,18	-	11.810.961,99	27.155.845,00	773.632,19	-	-
2	M	Europa	Diversos	683,00	14.030.156,31	-	-	8.640.726,34	364.044,98	3.095.630,55	1.929.754,44
Cenário EUA											
1	M	EUA	Diversos	742,00	43.173.361,45	-	12.831.235,42	29.501.664,69	840.461,33	-	-
2	M	EUA	Diversos	742,00	15.242.131,75	-	-	9.387.143,41	395.492,49	3.363.042,27	2.096.453,57
Todos os Cenários											
3	M	EUA Canadá	Nacional (EUA/Can.)	637,00	1.292.817,82	-	1.240.866,36	13.012,93	-	-	38.938,54
4	M	Brasil	Divinópolis-MG	1.840,00	2.517.203,14	-	758.194,09	1.741.007,39	18.001,66	-	-
5	M	EUA	Diversos	4,89	1.286.199,55	-	159.924,03	628.948,49	14.647,01	467.931,91	14.748,11
6	M	Brasil	Ouro Branco-MG	3.330,00	2.277.420,30	2.277.420,30	-	-	-	-	-
7	M	Brasil	Divinópolis-MG	1.840,00	2.565.827,11	-	307.277,70	705.588,13	803.775,30	645.990,55	103.195,43

Continua

Tabela A7 - Emissão total dos materiais (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id	Fase ACV	Fonte de dado ambiental		FEM (kg CO ₂ eq./und)	Emissão total (kg CO ₂ eq.) ¹						
		País Região	Local da produção		Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drena. OAC	Demais serviços
8	M	EUA	Irwindale-CA	3,63	218.838,19	-	-	116.413,51	13.196,69	52.671,69	36.556,30
9	M	EUA	Diversos	4,88	693.788,44	-	136.528,89	419.906,72	1.946,35	104.769,27	30.637,21
10	M	Itália	Pozzolo Formigaro	87,90	1.654.502,76	-	-	-	-	-	1.654.502,76
11	M	EUA	Irwindale-CA	3,63	389.437,67	-	157.130,91	230.854,35	-	-	1.452,41
12	M	EUA	Pleasanton-CA	5,72	609.914,57	-	51.107,81	558.806,76	-	-	-
13	M	EUA	Diversos	4,98	576.569,50	-	454.530,13	122.039,38	-	-	-
14	M	EUA	Diversos	5,08	300.094,91	-	22.110,00	254.998,83	-	-	22.986,08
15	M	SUÉCIA	Nacional (Sue.)	0,16	47.604,30	-	45.733,57	444,92	-	-	1.425,81
16	M	Brasil	Recife-PE	973,00	131.195,80	-	131.195,80	-	-	-	-
17	M	Europa	Diversos	1.230,00	200.319,17	-	60.771,73	139.547,43	-	-	-
18	M	Alemanha	Nacional (Ale.)	356,30	126.976,72	-	47.244,25	79.732,47	-	-	-
19	M	Europa	Diversos	1.530,00	274.071,86	-	67.278,76	173.899,56	7.929,70	19.313,55	5.650,28
20	M	Austrália	Diversos	1.400,00	1.391.766,77	-	1.285.897,25	25.858,11	-	-	80.011,41
21	M	Europa	Diversos	1.790,00	133.274,77	-	-	-	-	-	133.274,77

Continuação

Tabela A7 - Emissão total dos materiais (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id	Fase ACV	Fonte de dado ambiental		FEM (kg CO ₂ eq./und)	Emissão total (kg CO ₂ eq.) ¹						
		País Região	Local da produção		Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drena. OAC	Demais serviços
22	M	Espanha	Cantabria	574,00	18.417,32	-	-	-	18.417,32	-	-
23	M	Alemanha	Nacional (Ale.)	667,80	41.047,12	-	41.047,12	-	-	-	-
24	M	EUA	Irwindale-CA	3,63	5.467,32	5.467,32	-	-	-	-	-
25	M	EUA	Diversos	5,08	35.314,17	-	34.008,97	328,38	0,15	-	976,66
26	M	Europa	Diversos	439,00	17.119,56	-	6.290,12	10.829,44	-	-	-
27	M	Brasil	Recife-PE	973,00	26.117,54	-	-	-	-	6.796,85	19.320,68
28	M	Brasil	Ouro Branco-MG	3.360,00	52.828,89	-	-	-	52.828,89	-	-
29	M	Austrália	Diversos	1.400,00	293.924,62	-	-	-	2.179,05	2.592,35	289.153,21
30	M	Brasil	Divinópolis-MG	1.840,00	7.196,03	-	-	-	-	-	7.196,03
31	M	Espanha	Cantabria	574,00	584,02	-	-	-	584,02	-	-
32	M	Brasil	Ouro Branco-MG	3.330,00	393,66	-	-	-	-	-	393,66

Nota 1- valores obtidos pela multiplicação da quantidade de cada material (Tabela A1) por seu correspondente FEM.

Conclusão.

Tabela A8 - Emissão total dos equipamentos (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id.	Fase ACV ¹	Fonte de energia ²	Consumo de combustível (L/kW h)	Potência (kW)	FEC		FEE		Emissão total (kg CO ₂ eq.) ³						
					kg CO ₂ eq./L		kg CO ₂ eq./KWh		Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem e OAC	Demais serviços
					Diesel	Gasol.	Eletricidade								
1	T	D	0,14	188	2,621	-	-	5.946.459,83	5.946.459,83	-	-	-	-	-	
2	T	D	0,14	188	2,621	-	-	5.278.105,12	3.175,85	1.404.695,93	2.825.751,25	32.819,18	-	1.011.662,91	
3	T	D	0,10	136	2,621	-	-	794.461,60	-	224.668,22	-	-	-	569.793,38	
4	T	D	0,19	188	2,621	-	-	741.171,25	672.299,29	13.388,95	52.906,57	-	-	2.576,44	
5	T	D	0,14	188	2,621	-	-	579.859,63	531,40	73.166,81	319.787,96	51.527,40	-	134.846,06	
6	O	D	0,13	118	2,621	-	-	221.611,98	221.243,39	-	-	-	-	368,59	
7	T	D	0,14	188	2,621	-	-	394.752,28	-	83.227,00	311.525,28	-	-	-	
8	O	D	0,16	82	2,621	-	-	288.218,30	269.430,51	-	17.923,46	-	-	864,33	
9	T	D	0,19	136	2,621	-	-	327.737,83	-	-	-	-	77.186,04	250.551,79	
10	M	E	0	215	-	-	0,035	17.920,11	-	3.027,74	14.535,33	156,08	93,77	107,18	
11	O	D	0,15	93	2,621	-	-	144.919,54	104.921,56	17.973,14	13.530,71	-	3.123,99	5.370,15	
12	T	D	0,14	188	2,621	-	-	286.793,51	-	-	251.694,99	-	-	35.098,52	
13	T	D	0,19	136	2,621	-	-	300.591,84	-	91.151,54	198.645,70	4.991,85	-	5.802,75	
14	O	D	0,19	136	2,621	-	-	166.470,63	-	-	-	-	-	166.470,63	
15	O	D	0,08	195	2,621	-	-	90.993,76	-	17.524,80	73.468,96	-	-	-	
16	T	D	0,19	265	2,621	-	-	302.321,55	-	94.136,47	202.138,68	5.755,98	-	290,42	
17	T	D	0,19	136	2,621	-	-	181.672,48	-	-	-	-	-	181.672,48	
18	O	D	0,19	205	2,621	-	-	91.521,65	-	33.627,17	57.894,48	-	-	-	
19	M	D	0,19	260	2,621	-	-	304.125,68	-	51.384,45	246.682,01	2.648,80	1.591,39	1.819,03	
20	O	D	0,13	119	2,621	-	-	123.744,24	123.744,24	-	-	-	-	-	
21	O	D	0,18	77	2,621	-	-	145.469,65	131.006,12	-	13.064,73	-	768,77	630,02	
22	T	D	0,14	188	2,621	-	-	162.873,84	162.873,84	-	-	-	-	-	
23	M	D	0,14	5,2	2,621	-	-	1.640,36	-	-	-	-	-	1.640,36	
24	O	D	0,14	259	2,612	-	-	77.642,99	77.642,99	-	-	-	-	-	
25	O	E	0	2,2	-	-	0,035	3.128,81	-	-	-	-	3.128,81	-	
26	O	D	0,08	113	2,621	-	-	45.336,39	-	24.630,75	14.845,87	727,35	970,73	4.161,69	
27	O	D	0,10	56	2,621	-	-	23.705,93	-	-	-	23.705,93	-	-	

Continua

Tabela A8 - Emissão total dos equipamentos (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id.	Fase ACV ¹	Fonte de energia ²	Consumo de combustível (L/kW h)	Potência (kW)	FEC		FEE	Emissão total (kg CO ₂ eq.) ³						
					kg CO ₂ eq./L		kg CO ₂ eq./kW h	Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem e OAC	Demais serviços
					Diesel	Gasol.	Eletricidade							
28	M	E	0	260	-	-	0,035	3.310,92	-	3.177,04	31,84	-	-	102,04
29	O	D	0,19	82	2,621	-	-	47.125,93	-	13.786,06	32.897,06	-	-	442,80
30	O	D	0,13	58	2,621	-	-	47.710,01	-	-	-	-	13.507,94	34.202,07
31	O	D	0,13	103	2,621	-	-	42.275,62	42.275,62	-	-	-	-	-
32	M	G	0,35	10	-	2,096	-	44.648,29	-	-	-	1.842,88	26.932,63	15.872,78
33	O	D	0,17	331,1	2,621	-	-	94.799,56	-	-	-	94.799,56	-	-
34	O	G	0,35	4,1	-	2,096	-	57.144,44	-	-	-	-	15.081,69	42.062,74
35	O	D	0,17	158,13	2,621	-	-	86.239,54	-	-	-	-	-	86.239,54
36	O	D	0,13	85	2,621	-	-	31.178,84	-	13.842,86	16.414,17	-	-	921,82
37	O	G	0,26	2,4	-	2,096	-	76.283,88	-	-	-	13.960,55	62.323,33	-
38	O	D	0,27	82	2,621	-	-	45.138,16	-	16.064,39	28.557,79	-	-	515,98
39	O	D	0,19	136	2,621	-	-	38.653,56	-	-	-	-	-	38.653,56
40	O	D	0,19	11	2,621	-	-	56.636,33	-	-	-	5.786,48	34.563,33	16.286,52
41	O	D	0,15	44,8	2,621	-	-	13.697,46	-	5.032,76	8.664,70	-	-	-
42	O	E	0	4	-	-	0,035	1.185,79	-	-	-	96,09	895,58	194,12
43	T	D	0,10	115	2,621	-	-	29.540,74	-	-	-	-	-	29.540,74
44	M	D	0,19	365	2,621	-	-	65.229,85	-	62.592,08	627,34	-	-	2.010,43
45	T	D	0,19	136	2,621	-	-	38.841,82	-	16.388,24	22.453,59	-	-	-
46	O	D	0,19	130	2,621	-	-	30.102,63	-	23.730,97	6.371,66	-	-	-
47	O	D	0,05	450	2,621	-	-	2.501,06	-	-	-	2.501,06	-	-
48	O	G	0,35	3	-	2,096	-	11.247,82	-	-	-	-	1.786,54	9.461,28
49	O	G	0,35	10	-	2,096	-	31.394,42	-	9.874,66	21.519,75	-	-	-
50	M	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	O	D	0,19	188	2,621	-	-	22.454,84	5.221,28	-	-	16.528,22	-	705,34
52	O	G	0,35	4,1	-	2,096	-	25.838,35	-	-	25.723,76	-	114,59	-
53	O	E	0	7,5	-	-	0,035	325,75	-	-	-	-	-	325,75
54	O	D	0,16	97	2,621	-	-	14.126,47	-	7.753,78	2.081,86	-	4.290,83	-

Continuação

Tabela A8 - Emissão total dos equipamentos (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id.	Fase ACV ¹	Fonte de energia ²	Consumo de combustível (L/kW h)	Potência (kW)	FEC		FEE		Emissão total (kg CO ₂ eq.) ³						
					kg CO ₂ eq./L		kgCO ₂ /KWh		Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem e OAC	Demais serviços
					Diesel	Gasol.	Eletricidade								
55	O	D	0,19	136	2,621	-	-	14.790,16	-	-	-	-	-	14.790,16	
56	O	D	0,17	27	2,621	-	-	9.780,66	-	3.076,36	6.704,29	-	-	-	
57	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
58	O	D	0,18	410	2,621	-	-	6.463,48	-	6.463,48	-	-	-	-	
59	O	-	0		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
60	O	D	0,19	115	2,621	-	-	5.418,75	-	-	-	-	-	5.418,75	
61	M	D	0,15	12	2,621	-	-	1.693,06	-	1.624,60	16,28	-	-	52,18	
62	O	D	0,13	58	2,621	-	-	3.767,17	-	-	-	-	3.767,17	-	
63	O	D	0,19	84	2,621	-	-	10.986,69	-	-	-	10.986,69	-	-	
64	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
65	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
66	O	D	0,15	10,44	2,621	-	-	1.537,65	-	-	-	-	1.537,65	-	
67	O	E	0	30	-	-	0,035	82,85	-	-	-	82,85	-	-	
68	O	D	0,19	30	2,621	-	-	3.937,76	-	-	-	3.900,28	-	37,49	
69	O	D	0,14	127	2,621	-	-	1.754,04	-	-	-	-	-	1.754,04	
70	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
71	O	D	0,25	45,5	2,621	-	-	1.653,75	-	1.653,75	-	-	-	-	
72	M	E	0	13	-	-	0,035	121,16	-	-	-	121,16	-	-	
73	O	D	0,13	58	2,621	-	-	883,26	-	-	-	-	883,26	-	
74	O	E	0	5,5	-	-	0,035	48,37	-	-	-	48,37	-	-	
75	O	E	0	1,6	-	-	0,035	79,31	-	-	-	79,31	-	-	
76	O	D	0,15	82	2,621	-	-	263,35	-	-	-	-	-	263,35	
77	O	D	0,13	58	2,621	-	-	354,39	-	-	-	-	354,39	-	
78	O	E	0	7	-	-	0,035	13,55	-	-	-	-	-	13,55	
79	O	E	0	2,2	-	-	0,035	11,66	-	-	-	-	11,66	-	
80	O	E	0	5	-	-	0,035	8,47	-	-	-	8,47	-	-	
81	O	E	0	1	-	-	0,035	4,02	-	-	-	-	-	4,02	

Continuação

Tabela A8 - Emissão total dos equipamentos (FASE 3 – resultados determinísticos)

Id.	Fase ACV ¹	Fonte de energia ²	Consumo de combustível (L/kW h)	Potência (kW)	FEC		FEE	Emissão total (kg CO ₂ eq.) ³						
					kg CO ₂ eq./L		kgCO ₂ eq./kWh	Projeto Integral	Terrapl.	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem e OAC	Demais serviços
					Diesel	Gasol.	Eletricidade							
82	O	E	0	4	-	-	0,035	10,55	-	-	-	-	-	10,55
83	O	E	0	1,5	-	-	0,035	9,50	-	-	-	-	-	9,50
84	O	E	0	5,5	-	-	0,035	32,49	-	-	-	32,49	-	-
85	M	E	0	10	-	-	0,035	6,17	-	-	-	-	-	6,17
86	O	E	0	1,5	-	-	0,035	43,26	-	-	-	9,17	-	34,09
87	M	E	0	2,2	-	-	0,035	11,22	-	-	-	-	-	11,22
88	O	G	0,35	2,6	-	2,096	-	127,49	-	127,49	-	-	-	-
89	O	E	0	1,5	-	-	0,035	1,06	-	-	-	1,06	-	-
90	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	O	E	0	3,7	-	-	0,035	0,51	-	-	-	0,51	-	-
92	O	D	0,05	75	2,621	-	-	4,74	-	-	-	4,74	-	-
93	O	E	0	2,2	-	-	0,035	1,55	-	-	-	1,55	-	-
94	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
95	O	E	0	1,2	-	-	0,035	2,56	-	-	-	2,56	-	-
96	O	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	O	E	0	9,2	-	-	0,035	60,64	-	-	-	59,82	-	0,82
98	O	E	0	1,5	-	-	0,035	1,45	-	-	-	-	-	1,45
99	O	E	0	0,8	-	-	0,035	1,58	-	-	-	-	-	1,58
100	O	E	0	2,2	-	-	0,035	1,97	-	-	-	1,95	-	0,02
101	M	D	0,19	3,7	2,621	-	-	0,08	-	-	-	0,08	-	-

Nota ¹ O: Obra, T: Transporte, M: Material / Nota ² – E: energia elétrica (rede pública); G: gasolina (mistura); D: Diesel (mistura) / Nota ³ – os resultados de emissão total foram obtidos pela multiplicação dos quantitativos de cada equipamento (Tabela A2) pelo fator de emissão correspondente.

Conclusão.

Tabela A9 – Resumo dos resultados determinísticos de emissão total (FASE 3 – resultados determinísticos)

Cenário	Tipo	Fase ACV	Emissão total (kg CO ₂ eq.)							
			Projeto Integral	Terraplanagem	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem/OAC	Demais serviços	
BR	Materiais (Tabela A7)	Material	64.894.843,95	2.282.887,62	15.486.556,18	36.983.157,11	1.942.923,98	4.046.701,78	4.152.617,28	
		Material	438.706,91	-	121.805,91	261.892,81	4.769,00	28.617,80	21.621,40	
	Equipamentos (Tabela A8)	Obra	2.260.963,02	975.485,70	195.162,42	339.663,26	173.325,05	147.110,27	430.216,31	
		Transporte	15.365.183,32	6.785.340,21	2.000.823,15	4.184.904,03	95.094,40	77.186,04	2.221.835,48	
	Materiais e Equipamentos	Material	65.333.550,86	2.282.887,62	15.608.362,09	37.245.049,92	1.947.692,97	4.075.319,58	4.174.238,68	
		Obra	2.260.963,02	975.485,70	195.162,42	339.663,26	173.325,05	147.110,27	430.216,31	
		Transporte	15.365.183,32	6.785.340,21	2.000.823,15	4.184.904,03	95.094,40	77.186,04	2.221.835,48	
		Total	82.959.697,20	10.043.713,54	17.804.347,66	41.769.617,21	2.216.112,43	4.299.615,89	6.826.290,47	
	EUR	Materiais (Tabela A7)	Material	70.956.829,09	2.282.887,62	16.818.099,48	41.018.788,14	2.071.183,33	4.395.696,73	4.370.173,78
			Material	438.706,91	-	121.805,91	261.892,81	4.769,00	28.617,80	21.621,40
Equipamentos (Tabela A8)		Obra	2.260.963,02	975.485,70	195.162,42	339.663,26	173.325,05	147.110,27	430.216,31	
		Transporte	15.365.183,32	6.785.340,21	2.000.823,15	4.184.904,03	95.094,40	77.186,04	2.221.835,48	
Materiais e Equipamentos		Material	71.395.536,00	2.282.887,62	16.939.905,38	41.280.680,95	2.075.952,33	4.424.314,53	4.391.795,18	
		Obra	2.260.963,02	975.485,70	195.162,42	339.663,26	173.325,05	147.110,27	430.216,31	
		Transporte	15.365.183,32	6.785.340,21	2.000.823,15	4.184.904,03	95.094,40	77.186,04	2.221.835,48	
		Total	89.021.682,34	10.043.713,54	19.135.890,96	45.805.248,24	2.344.371,79	4.648.610,84	7.043.846,97	
EUA		Materiais (Tabela A7)	Material	75.601.726,80	2.282.887,62	17.838.372,91	44.111.024,90	2.169.459,99	4.663.108,45	4.536.872,92
			Material	438.706,91	-	121.805,91	261.892,81	4.769,00	28.617,80	21.621,40
	Equipamentos (Tabela A8)	Obra	2.260.963,02	975.485,70	195.162,42	339.663,26	173.325,05	147.110,27	430.216,31	
		Transporte	15.365.183,32	6.785.340,21	2.000.823,15	4.184.904,03	95.094,40	77.186,04	2.221.835,48	
	Materiais e Equipamentos	Material	76.040.433,71	2.282.887,62	17.960.178,82	44.372.917,71	2.174.228,99	4.691.726,25	4.558.494,32	
		Obra	2.260.963,02	975.485,70	195.162,42	339.663,26	173.325,05	147.110,27	430.216,31	
		Transporte	15.365.183,32	6.785.340,21	2.000.823,15	4.184.904,03	95.094,40	77.186,04	2.221.835,48	
		Total	93.666.580,04	10.043.713,54	20.156.164,40	48.897.485,00	2.442.648,44	4.916.022,56	7.210.546,11	

Tabela A10 – Estatística das simulações do MMC do Modelo de ACV do cenário BR (FASE 4 – resultados probabilísticos)

Parâmetro	Projeto Integral	Terraplanagem	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem/OAC	Demais serviços
Total de iterações	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000
Média	3.369.508,134	407.919,594	723.138,806	1.696.302,075	1.098,597	174.683,141	277.266,555
Mediana	3.369.283,198	407.975,339	723.311,633	1.696.717,176	1.098,655	174.700,194	277.294,442
Desvio Padrão	49.847,560	9.955,571	14.947,328	31.831,343	32,204	4.211,028	5.759,702
Obliquidade	- 0,018	- 0,010	0,001 -	0,035	- 0,013	0,015	0,024
Curtose	2,741	2,560	2,707	2,646	2,520	2,737	2,578
Coefficiente de Variação	0,0148	0,024	0,0207	0,0188	0,0293	0,0241	0,0208
Mínimo	3.202.212,292	379.010,166	677.381,168	1.592.132,049	1.003,010	161.093,389	260.198,698
Máximo	3.569.349,612	435.216,514	772.747,488	1.803.707,535	1.194,992	188.774,358	294.515,838
Largura do Intervalo	367.137,320	56.206,348	95.366,320	211.575,486	191,982	27.680,969	34.317,139
Erro Padrão Média	352,475	99,556	149,473	259,902	0,322	42,110	57,597

Tabela A11 - Estatística das simulações do MMC do Modelo de ACV do cenário EUR (FASE 4 – resultados probabilísticos)

Parâmetro	Projeto Integral	Terraplanagem	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem/OAC	Demais serviços
Total de iterações	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000
Média	3.618.304,483	407.919,594	777.812,858	1.859.600,344	1.161,286	189.101,557	286.205,195
Mediana	3.618.694,222	407.975,339	777.756,698	1.859.832,783	1.161,752	189.376,297	286.279,981
Desvio Padrão	296.860,215	9.955,571	83.605,851	200.708,646	79,376	21.994,823	14.624,972
Obliquidade	- 0,006 -	0,010 -	0,003 -	0,001 -	0,010 -	0,022 -	0,001
Curtose	2,047	2,560	1,824	2,018	2,390	1,824	2,105
Coefficiente de Variação	0,0820	0,024	0,1078	0,1079	0,0684	0,1163	0,0511
Mínimo	2.934.275,370	379.010,166	616.641,904	1.416.305,010	934,665	144.686,248	250.149,670
Máximo	4.292.739,516	435.216,514	941.113,701	2.306.650,643	1.389,630	232.840,850	322.416,115
Largura do Intervalo	1.358.464,146	56.206,348	324.471,797	890.345,632	454,966	88.154,602	72.266,445
Erro Padrão Média	1.327,599	99,556	482,699	1.158,792	0,458	126,987	84,437

Tabela A12 - Estatística das simulações do MMC do Modelo de ACV do cenário EUA (FASE 4 – resultados probabilísticos)

Parâmetro	Projeto Integral	Terraplanagem	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	Drenagem/OAC	Demais serviços
Total de iterações	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000	20.000,000
Média	3.805.341,081	407.919,594	818.488,184	1.985.124,229	1.210,792	199.604,043	292.834,628
Mediana	3.804.073,123	407.975,339	818.159,501	1.984.621,824	1.210,906	199.551,081	292.829,481
Desvio Padrão	209.932,879	9.955,571	58.875,527	141.104,863	59,877	15.455,553	11.025,533
Obliquidade	0,001 -	0,010 -	0,004	0,013	0,009	0,002 -	0,002
Curtose	2,305	2,560	2,169	2,297	2,623	2,180	2,483
Coefficiente de Variação	0,0552	0,024	0,0719	0,0711	0,0495	0,0774	0,0377
Mínimo	3.227.056,782	379.010,166	679.135,819	1.604.033,045	1.021,193	161.565,755	258.947,652
Máximo	4.390.853,753	435.216,514	957.947,910	2.370.228,840	1.395,079	238.847,084	326.528,289
Largura do Intervalo	1.163.796,971	56.206,348	278.812,091	766.195,796	373,885	77.281,329	67.580,637
Erro Padrão Média	1.212,048	99,556	339,918	814,669	0,346	89,233	63,656

MEMORIAL 1 - Fatores de emissão relativos à queima dos combustíveis puros nacionais (Tabela 3.3, seção 3.4.1)

Fatores de emissão do CH₄ (em kg de CH₄/L)

Gasolina automotiva pura:

Massa específica: 0,742 kg/L

Poder calorífico inferior: 10.400 Kcal/kg

Valor original do fator (IPCC, 2006): 25 kg/TJ

1 kcal = 4186,8 J

Fator de emissão: $(25 \times 10.400 \times 0,742 \times 4186,8) / 10E12 = 0,00081$ kg CH₄/L

Óleo diesel puro:

Massa específica: 0,840 kg/L

Poder calorífico inferior: 10.100 Kcal/kg

Valor original do fator (IPCC, 2006): 3,9 kg/TJ

1 kcal = 4186,8 J

Fator de emissão: $(3,9 \times 10.100 \times 0,840 \times 4186,8) / 10E12 = 0,00014$ kg CH₄/L

Biodiesel (B100):

Massa específica: 0,880 kg/L

Poder calorífico inferior: 9.000 Kcal/kg

Valor original do fator (IPCC, 2006): 18 kg/TJ

1 kcal = 4186,8 J

Fator de emissão: $(18 \times 9.000 \times 0,880 \times 4186,8) / 10E12 = 0,00060$ kg CH₄/L

Etanol anidro:

Massa específica: 0,790 kg/L

Poder calorífico inferior: 6.750 Kcal/kg

Valor original do fator (IPCC, 2006): 18 kg/TJ

1 kcal = 4186,8 J

Fator de emissão: $(18 \times 6.750 \times 0,790 \times 4186,8) / 10E12 = 0,00040$ kg CH₄/L

Fatores de emissão do N₂O (em kg de N₂O/L)

Gasolina automotiva pura:

Massa específica: 0,742 kg/L

Poder calorífico inferior: 10.400 Kcal/kg

Valor original do fator (IPCC, 2006): 8 kg/TJ

1 kcal = 4186,8 J

Fator de emissão: $(8 \times 10.400 \times 0,742 \times 4186,8) / 10E12 = 0,00026 \text{ kg N}_2\text{O/L}$

Óleo diesel puro:

Massa específica: 0,840 kg/L

Poder calorífico inferior: 10.100 Kcal/kg

Valor original do fator (IPCC, 2006): 3,9 kg/TJ

1 kcal = 4186,8 J

Fator de emissão: $(3,9 \times 10.100 \times 0,840 \times 4186,8) / 10E12 = 0,00014 \text{ kg CH}_4\text{/L}$

MEMORIAL 2 - Fatores de emissão relativos à queima dos combustíveis comerciais nacionais (Tabela 3.5, seção 3.4.1)

FECs do Modelo de ACV

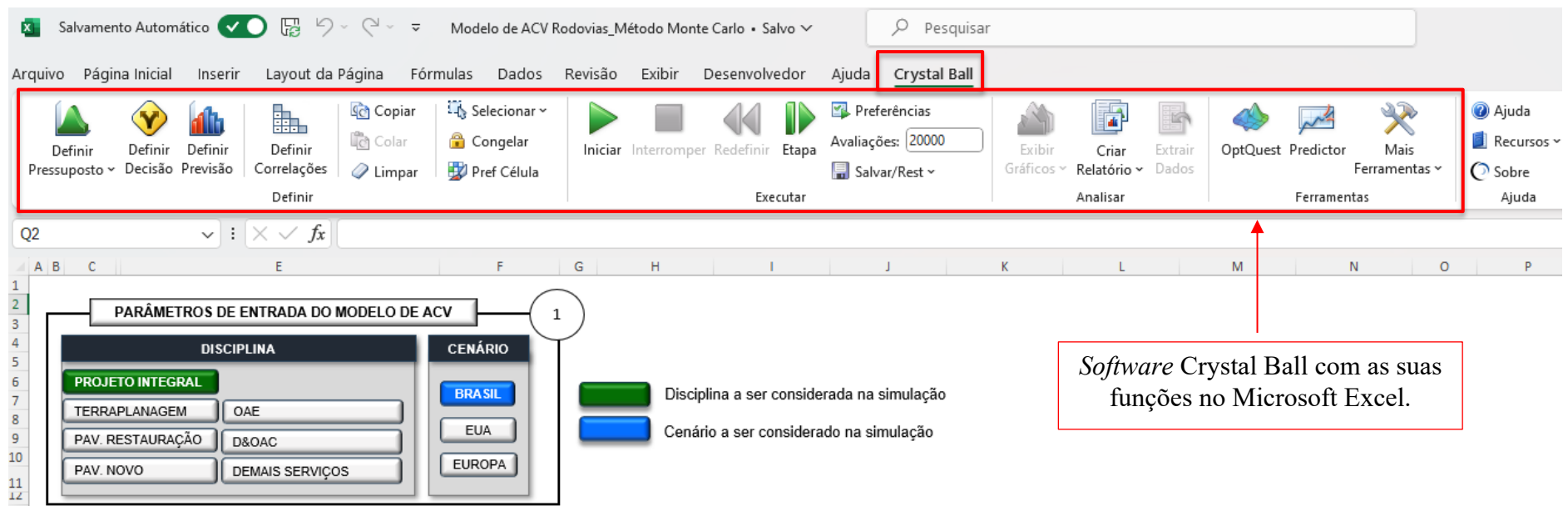
Gasolina (mistura): $[1 \times 2,212 + 28 \times 0,00081 + 265 \times 0,00026] \times [1-0,27] + [1 \times 1,526 + 28 \times 0,00040] \times [0,27] = 2,096 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./L}$

Diesel (mistura): $[1 \times 2,603 + 28 \times 0,00014 + 265 \times 0,00014] \times [1-0,115] + [1 \times 2,431 + 28 \times 0,0006] \times [0,115] = 2,621 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./L}$

MANUAL DE USO DO MODELO DE ACV

Os resultados probabilísticos do Modelo de ACV seguem os procedimentos da seção 3.6 da metodologia desta dissertação. As simulações do Método Monte Carlo foram feitas no *software* Crystal Ball, que funciona como um suplemento do Microsoft Excel introduzindo novos ícones com funções associadas, conforme mostrado na Figura A1.

Figura A1 - *Software* Crystal Ball associado ao programa Microsoft Excel



Fonte: Autor.

No Microsoft Excel, o Modelo de ACV foi organizado em uma única aba com 5 campos principais, conforme detalhado na Figura A2. As Figuras A3-A6 ilustram esses campos no Excel.

Figura A2 – Campos do Modelo de ACV no Microsoft Excel

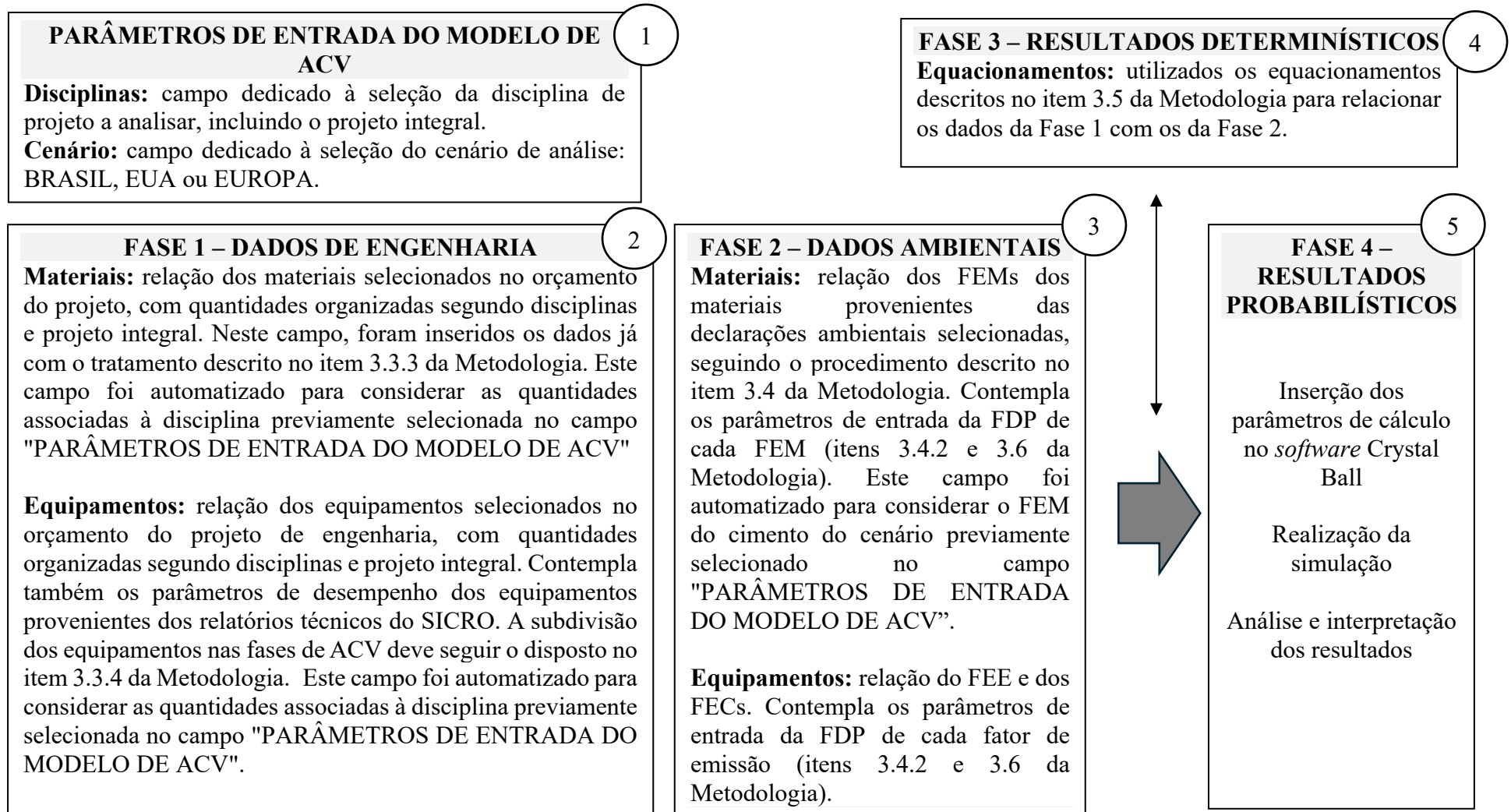


Figura A3 - Campo com os parâmetros utilizados como entradas da simulação do Método Monte Carlo do Modelo de ACV (CAMPO 1)

PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO DE ACV

DISCIPLINA		CENÁRIO
PROJETO INTEGRAL		BRASIL
TERRAPLANAGEM	OAE	EUA
PAV. RESTAURAÇÃO	D&OAC	EUROPA
PAV. NOVO	DEMAIS SERVIÇOS	

1

Disciplina a ser considerada na simulação

Cenário a ser considerado na simulação

Fonte: Autor.

Figura A4 – Exemplo de organização dos dados de engenharia do Modelo de ACV no Microsoft Excel ¹ (CAMPO 2)

FASE 1 - DADOS DE ENGENHARIA													
Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und.	BASE DE DADOS: Orçamento do Projeto de Engenharia							BASE DE DADOS: Relatórios SICRO		
				MATERIAIS (Quantidade x Disciplina)							EQUIPAMENTOS (Parâmetros Operacionais)		
				Projeto Integral	Terraplanagem	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	D&OAC	Demais serviços	Potência (kW)	Fonte de energia	Consumo de combustível (L/kWh)
M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	Material	t	58.185,12	-	17.292,77	39.759,66	1.132,70	-	-	-	-	-
M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	Material	t	20.541,96	-	-	12.651,14	533,01	4.532,40	2.825,41	-	-	-
M1943	Cimento asfáltico de petróleo	Material	t	2.029,54	-	1.947,98	20,43	-	-	61,13	-	-	-
M0003	Aço CA 25	Material	t	1.368,05	-	412,06	946,20	9,78	-	-	-	-	-
M0191	Brita 1	Material	t	263.026,49	-	32.704,30	128.619,32	2.995,30	95.691,60	3.015,97	-	-	-
M0946	Aço em perfis ASTM A572 grau 50	Material	t	683,91	683,91	-	-	-	-	-	-	-	-
M0004	Aço CA 50	Material	t	1.394,47	-	167,00	383,47	436,83	351,08	56,08	-	-	-
M0082	Areia média lavada	Material	t	60.286,00	-	-	32.069,84	3.635,45	14.510,11	10.070,60	-	-	-
M0192	Brita 2	Material	t	142.169,76	-	27.977,23	86.046,46	398,84	21.469,11	6.278,12	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Código SICRO	Descrição	Fase ACV	Und.	BASE DE DADOS: Orçamento do Projeto de Engenharia							BASE DE DADOS: Relatórios SICRO		
				EQUIPAMENTOS (Quantidade x Disciplina)							EQUIPAMENTOS (Parâmetros Operacionais)		
				Projeto Integral	Terraplanagem	Pav. restauração	Pav. novo	OAE	D&OAC	Demais serviços	Potência (kW)	Fonte de energia	Consumo de combustível (L/kWh)
E9667	Caminhão basculante com capacidade de 14 m ³ - 188 kW	Transporte	h	86.197,57	86.197,57	-	-	-	-	-	188,00	Diesel (mistura)	0,14
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transporte	h	76.509,36	46,04	20.361,93	40.960,99	475,73	-	14.664,67	188,00	Diesel (mistura)	0,14
E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW	Transporte	h	22.287,25	-	6.302,68	-	-	-	15.984,57	136,00	Diesel (mistura)	0,10
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Transporte	h	7.916,43	7.180,81	143,01	565,09	-	-	27,52	188,00	Diesel (mistura)	0,19
E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW	Transporte	h	8.405,42	7,70	1.060,60	4.635,52	746,92	-	1.954,68	188,00	Diesel (mistura)	0,14
E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba	Obra	h	5.511,76	5.502,59	-	-	-	-	9,17	118,00	Diesel (mistura)	0,13
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropeleido	Obra	h	8.381,28	7.834,93	-	521,21	-	-	25,13	82,00	Diesel (mistura)	0,16
E9044	Central de concreto com capacidade de 150 m ³ /h	Material	h	2.348,81	-	396,85	1.905,17	20,46	12,29	14,05	215,00	Eletricidade	-
E9524	Motoniveladora - 93 kW	Obra	h	3.963,47	2.869,54	491,55	370,06	-	85,44	146,87	93,00	Diesel (mistura)	0,15

Nota ¹ Representação parcial dos dados de engenharia utilizados nas simulações do Método Monte Carlo do Modelo de ACV desta pesquisa. Os dados completos constam nas Tabelas A1 e A2.

Fonte: Autor.

Figura A5 - Exemplo de organização dos dados ambientais do Modelo de ACV no Microsoft Excel ¹ (CAMPO 3)

FASE 2 - DADOS AMBIENTAIS					
BASE DE DADOS: Declarações Ambientais					
Tipo de FDP	Valor médio (FEM) (kg CO2 eq./ und.)	Parâmetros de forma da FDP		Extremos da FDP	
		α	β	a	b
Beta Modificada	606,00	5,00	5,00	545,40	666,60
Beta Modificada	606,00	5,00	5,00	545,40	666,60
Beta Modificada	637,00	2,00	2,00	477,75	796,25
Beta Modificada	1.840,00	3,00	3,00	1.472,00	2.208,00
Beta Modificada	4,89	3,00	3,00	3,91	5,87
Beta Modificada	3.330,00	3,00	3,00	2.664,00	3.996,00
Beta Modificada	1.840,00	3,00	3,00	1.472,00	2.208,00
Beta Modificada	3,63	3,00	3,00	2,90	4,36
Beta Modificada	4,88	3,00	3,00	3,90	5,86
-	-	-	-	-	-

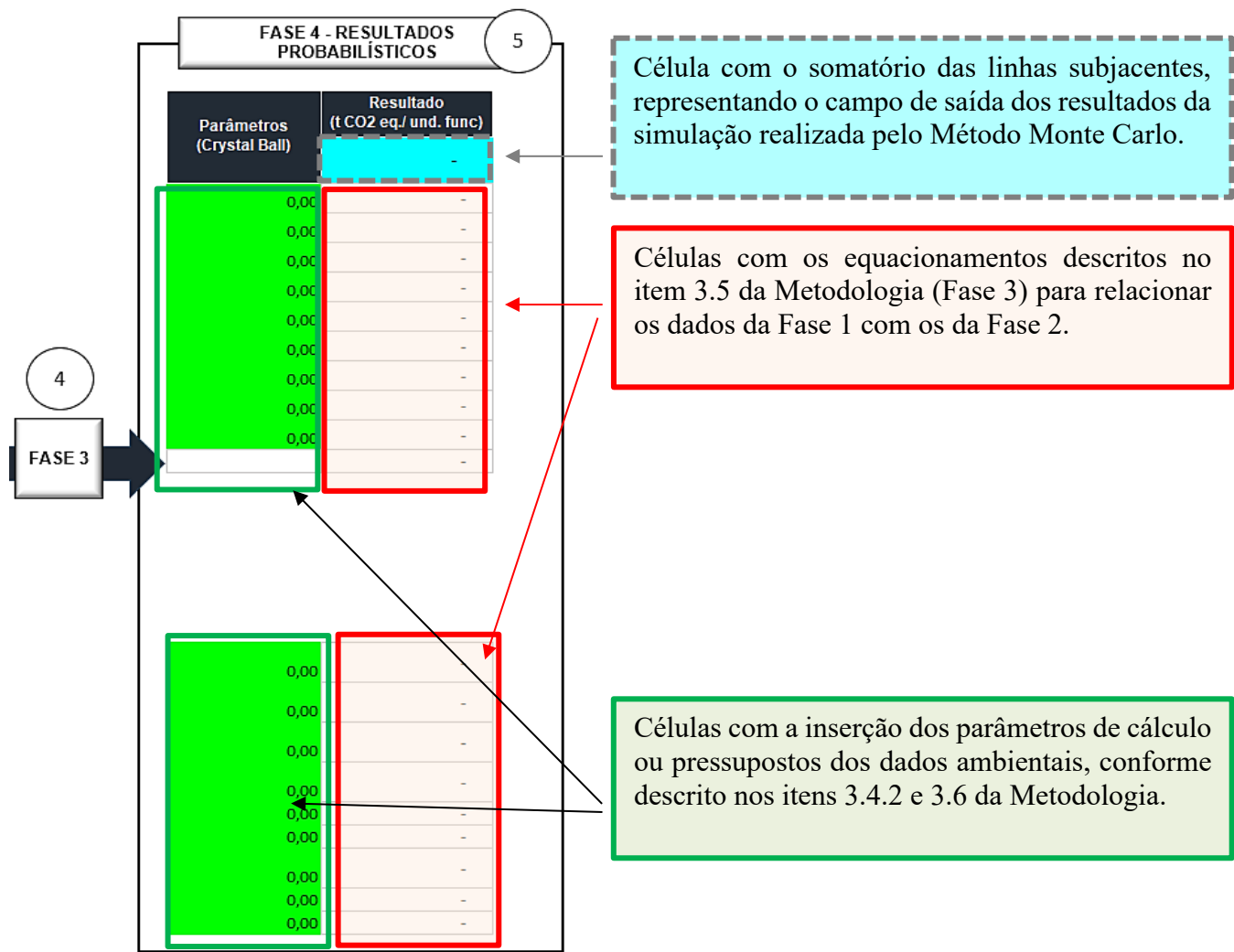
BASES DE DADOS: EPE, CETESB e IPCC						
Tipo de FDP	Fator de emissão da eletricidade (FEE) (Média: 0,035 Kg CO2 eq./kW h)		Fator de emissão dos combustíveis (FEC)			
	Mínimo (-30%)	Máximo (+30%)	FECgasolina-m (Média: 2,096 kg CO2 eq./L)		FECdiesel-m (Média: 2,621 kg CO eq./L)	
			Mínimo (-5%)	Máximo (+5%)	Mínimo (-5%)	Máximo (+5%)
Uniforme	0,0245	0,0455	1,991	2,201	2,490	2,752
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						
Uniforme						

3

Nota ¹ Representação parcial dos dados ambientais utilizados nas simulações do Método Monte Carlo do Modelo de ACV desta pesquisa. Os dados completos constam nas Tabelas A3, A4, A5 e A6.

Fonte: Autor.

Figura A6 – Detalhamento da Fase 4 do Modelo de ACV no Microsoft Excel (CAMPOS 4 e 5)



Fonte: Autor.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE CRYSTAL BALL

As Figuras A7 – A13 exemplificam com um passo a passo as funções do *software* Crystal Ball utilizadas no Modelo de ACV desta pesquisa.

PASSO 1 – após definida a estrutura de organização dos dados do Modelo de ACV em uma única aba do Microsoft Excel, conforme apresentado nas Figuras A1-A6, a inserção dos pressupostos de cada dado ambiental no *software* Crystal Ball é realizada. Para isso, o programa disponibiliza uma galeria de tipos de distribuição, conforme ilustrado na Figura A7.

Figura A7 – Seleção do tipo de distribuição de probabilidade aplicado ao dado ambiental

2º - função com a listagem dos tipos de distribuição de probabilidade disponíveis no Crystal Ball.

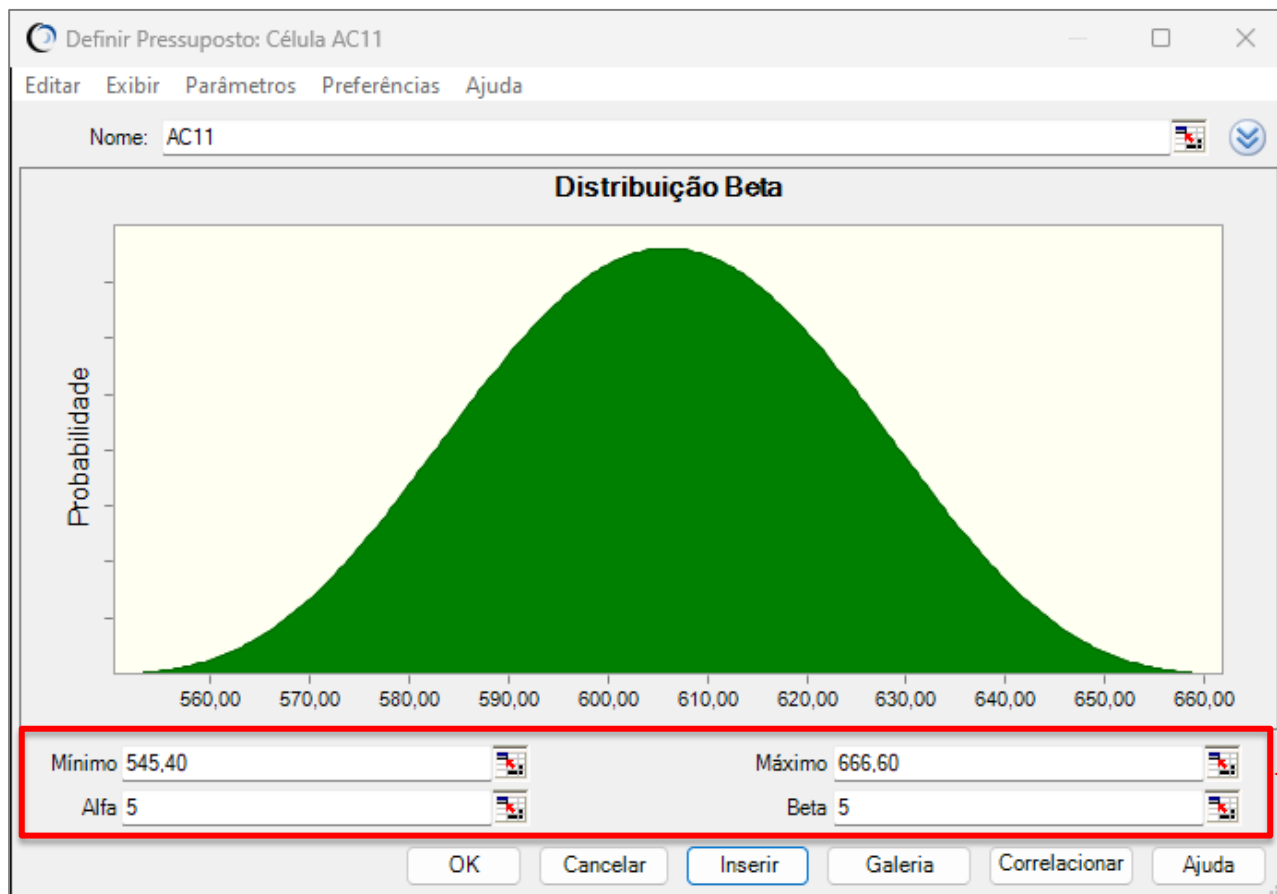
3º - seleção do tipo de distribuição de probabilidade aplicado a cada dado ambiental (item 3.6 da Metodologia)

1º - seleção da célula cujos pressupostos devem ser inseridos.

Intervalo (+)	CO2 eq./ und.
3.468,30	0
3.468,30	0
69.422,60	0
65.280,00	0
93,73	0
41.448,00	0
65.280,00	0
74,02	0
93,44	0
1.356,00	0
74,02	0
123,41	0
95,54	0

PASSO 2 – ao definir a distribuição de probabilidade para cada dado ambiental (item 3.6 da Metodologia), uma nova janela surge na qual devem ser informados os parâmetros que definem a curva de distribuição de probabilidade, conforme apresentado na Figura A8.

Figura A8 – Definição dos parâmetros que definem a curva de distribuição probabilidade do dado ambiental



Parâmetros da curva de distribuição de probabilidade – exemplo associado ao FEM do cimento utilizado no cenário BR.

PASSO 3 – após a definição e confirmação dos parâmetros da curva de distribuição de probabilidade do dado ambiental, a célula do Microsoft Excel previamente selecionada para a inserção das informações altera sua cor para verde, indicando a inclusão das características da curva na célula, conforme ilustra a Figura A9.

Figura A9 – Célula com a definição das características da curva de distribuição de probabilidade do dado ambiental

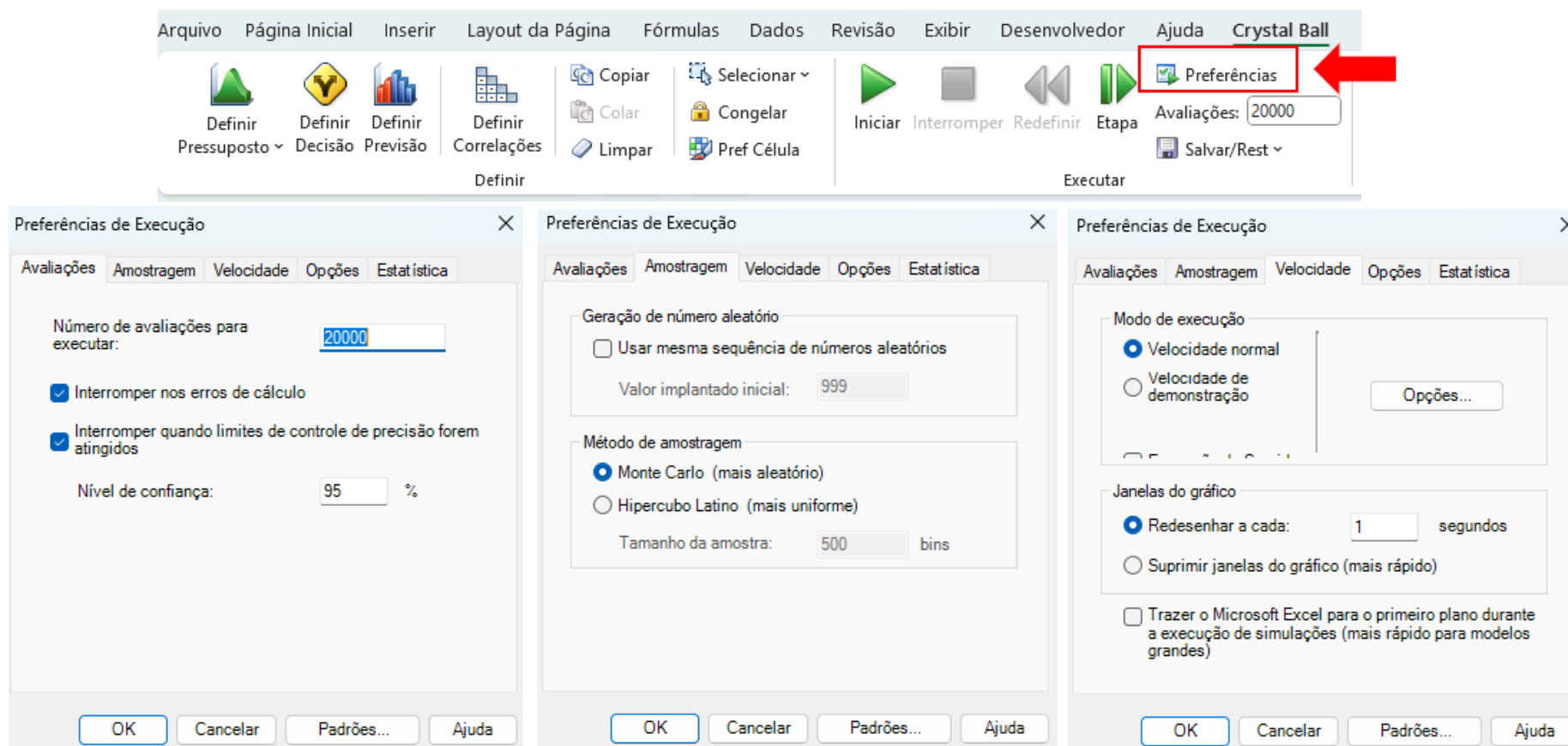
The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the Crystal Ball ribbon active. The ribbon includes options for defining scenarios, preferences, and execution. The active cell is AD10, containing the formula `=SOMA(AD11:AD299)`. The worksheet displays a table of environmental parameters for 'Energia Primária' and a 'MODELAGEM SMC' section. A cell in the 'MODELAGEM SMC' section is highlighted in green, indicating the insertion of distribution curve characteristics.

Parâmetros ambientais							MODELAGEM SMC
Energia Primária							
Intervalo (+)	Valor determinístico (MJ/ und.)	α	β	Intervalo (-)	Intervalo (+)		
666,60	3.153,00	5,00	5,00	2.837,70	3.468,30	0	
666,60	3.153,00	5,00	5,00	2.837,70	3.468,30	0	
796,25	53.402,00	1,00	1,00	37.381,40	69.422,60	0	
2.208,00	54.400,00	3,00	3,00	43.520,00	65.280,00	0	

Mudança de cor da célula para verde, indicando a inserção das características da curva de distribuição de probabilidade na célula.

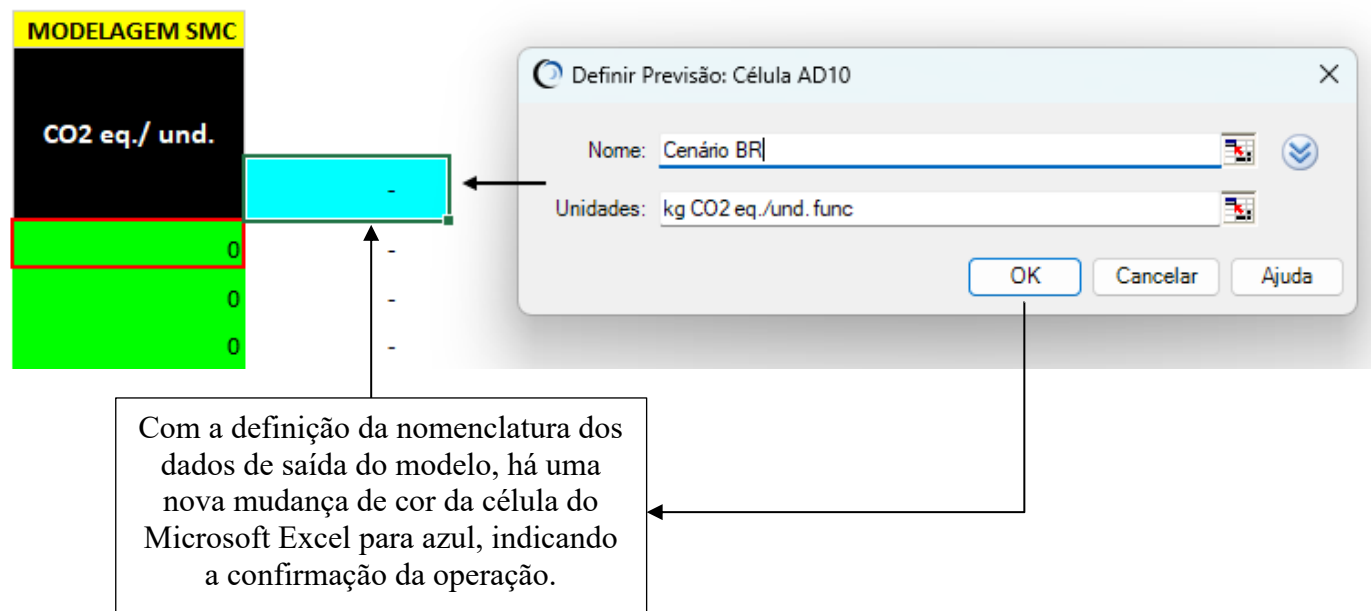
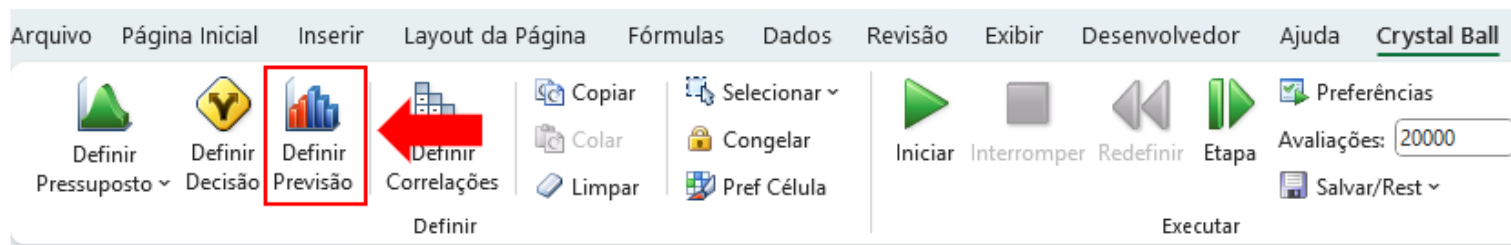
PASSO 4 – os procedimentos descritos anteriormente devem ser repetidos para todos os dados ambientais do Modelo de ACV. Como próximo passo, são definidas as preferências das simulações do Método Monte Carlo, conforme ilustra a Figura A10.

Figura A10 – Definição das preferências das simulações Método Monte Carlo



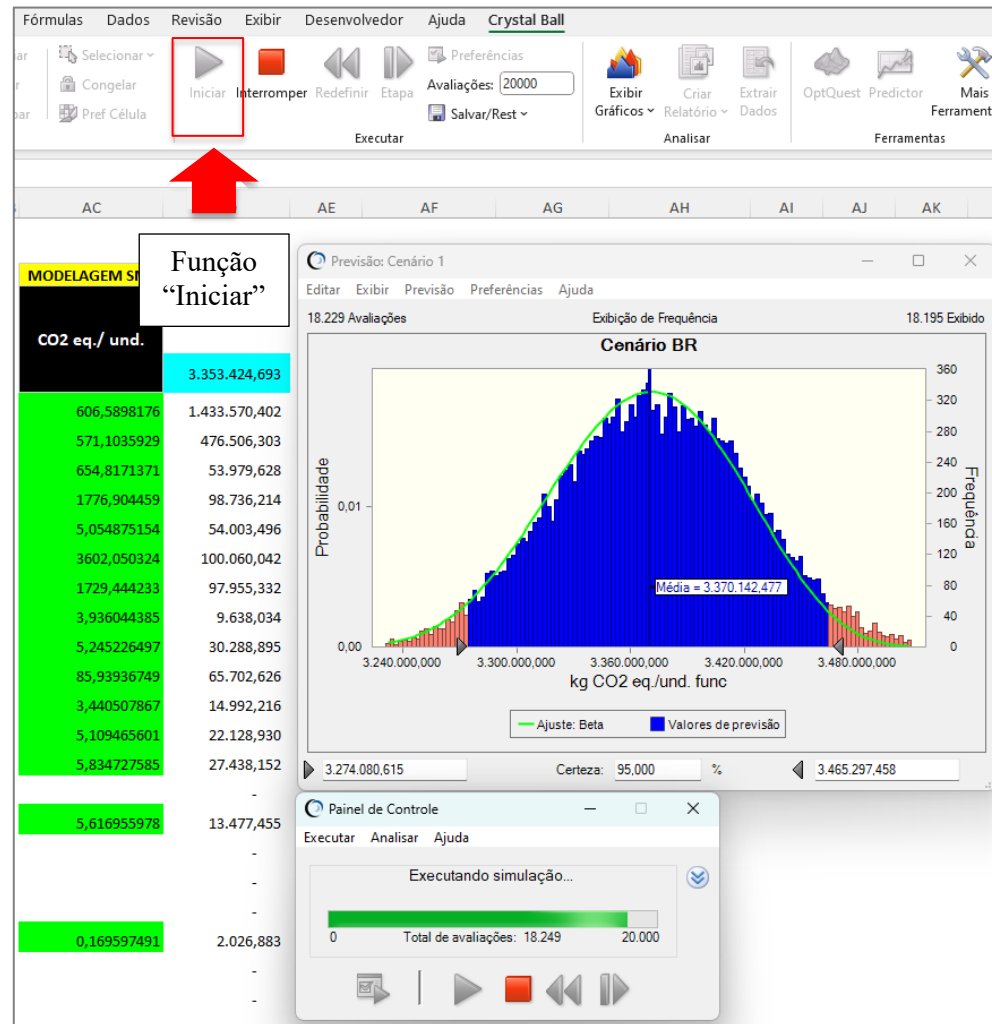
PASSO 5 – o próximo passo consiste em selecionar a célula de saída dos resultados do Modelo de ACV e definir a nomenclatura de seus dados, conforme detalhado na Figura A11.

Figura A11 – Seleção da célula de saída dos resultados e definição da nomenclatura de seus dados



PASSO 6 – Com a definição da nomenclatura dos dados de saída do modelo, a simulação Monte Carlo pode ser iniciada (Figura A12).

Figura A12 –Exemplo da simulação Monte Carlo para o projeto integral do Cenário BR



PASSO 7 – Finalizada a simulação, os resultados podem ser analisados e interpretados. As funções do *software* Crystal Ball utilizadas neste último passo estão indicadas na Figura A13 ¹.

Figura A13 – Funções do *software* Crystal Ball com os resultados da simulação realizada

Resultados com os dados estatísticos completos da simulação realizada.

Mostra a influência de cada dado de entrada ou pressuposto do modelo nas previsões dos resultados da simulação Monte Carlo.

β	Intervalo (-)	Intervalo (+)	CO2 eq./ un
5,00	2.837,70	3.468,30	0
5,00	2.837,70	3.468,30	0
1,00	37.381,40	69.422,60	0
3,00	43.520,00	65.280,00	0

Nota ¹ Destaca-se que uma vez encerrada a simulação, as células indicadas nas cores verde e azul da planilha do Microsoft Excel não exibem os resultados da simulação. Os resultados devem ser obtidos na função "Exibir Gráficos" do *software* Crystal Ball.