



**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE
SERVIÇOS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES A
PARTIR DE DADOS DO SICRO: ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE PAVIMENTOS ASFÁLTICO E DE CONCRETO COM
MONETIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO**

ALICE AMORIM TELES

**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**

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SERVIÇOS DE
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES A PARTIR DE DADOS DO
SICRO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS ASFÁLTICO
E DE CONCRETO COM MONETIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE
CARBONO**

ALICE AMORIM TELES

ORIENTADORA: DSc. MICHELE TEREZA M. CARVALHO

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

**PUBLICAÇÃO: E.DM-xxx/xx
BRASÍLIA-DF, NOVEMBRO DE 2024**

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

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SERVIÇOS DE
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES A PARTIR DE DADOS DO
SICRO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS ASFÁLTICO
E DE CONCRETO COM MONETIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE
CARBONO**

ALICE AMORIM TELES

**DISSERTAÇÃO 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^ª. Michele Tereza Marque Carvalho, DSc. (UnB)
(Orientadora)**

**Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc. (UnB)
(Examinador interno)**

**Prof. Lucas Rosse Caldas, DSc. (UFRJ)
(Examinador externo)**

BRASÍLIA-DF, NOVEMBRO DE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

TELES, ALICE AMORIM

Método para avaliação do ciclo de vida de serviços de infraestrutura de transportes a partir de dados do SICRO: análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto com monetização das emissões de carbono [distrito federal] 2024.

xvi, 96p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2024).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------------|--------------|
| 1. Avaliação do ciclo de vida | 4. Pavimento |
| 2. Infraestrutura de transportes | 5. SICRO |
| 3. Monetização do CO ₂ | |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TELES, A. A. Método para avaliação do ciclo de vida de serviços de infraestrutura de transportes a partir de dados do SICRO: análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto com monetização das emissões de carbono. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-xxx/xx, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alice Amorim Teles

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Método para avaliação do ciclo de vida de serviços de infraestrutura de transportes a partir de dados do SICRO: análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto com monetização das emissões de carbono

GRAU: Mestre em Estruturas e Construção Civil 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.

Alice Amorim Teles

SHIS QI 29 Conjunto 15 casa 9, Lago Sul

71.675-350 – Brasília/DF – Brasil

*“Não podemos resolver nossos
problemas com o mesmo pensamento
que usamos para criá-los.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SERVIÇOS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES A PARTIR DE DADOS DO SICRO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS ASFÁLTICO E DE CONCRETO COM MONETIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO

Autora: Alice Amorim Teles

Orientadora: Michele Tereza Marque Carvalho

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, novembro de 2024

Em todo o mundo, é crescente a preocupação e importância atribuídas à sustentabilidade, principalmente quando se trata de um setor com tantos impactos no meio ambiente como o da infraestrutura de transportes. Diversas iniciativas de financiamento já exigem a comprovação do desempenho ambiental para fornecimento de recursos, de modo que essa prática tem se tornado cada vez mais essencial nos estudos de viabilidade dos empreendimentos. Entretanto, em âmbito nacional, a análise de impacto do ciclo de vida de empreendimentos de infraestrutura se depara com desafios para sua consolidação como prática na elaboração e planejamento de projetos em razão da ausência de dados e do desconhecimento acerca do seu desenvolvimento. Posto isso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um método prático e abrangente de avaliação do ciclo de vida (ACV), aplicável a diversos elementos da infraestrutura de transportes, utilizando dados provenientes de orçamentos elaborados com o Sistema de Custos Referenciais de Obra (SICRO), além de incluir a quantificação dos custos associados às emissões de carbono dessas estruturas. Para tanto, o método proposto divide-se em cinco etapas: (i) definição de escopo do elemento de estudo, (ii) ACV a partir de dados do SICRO, (iii) qualificação da ACV obtida com os dados do SICRO por meio de modelagem no *software* OpenLCA, (iv) avaliação do custo de ciclo de vida (ACCV) utilizando a metodologia preconizada no SICRO e (v) cálculo do custo de emissão de carbono. Visando demonstrar o método proposto, sua aplicação foi desenvolvida para comparar duas estruturas de pavimento: uma com revestimento asfáltico e outra em concreto de cimento Portland. Os valores obtidos a partir dos dados do SICRO indicaram que o pavimento asfáltico possui um consumo energético 252% maior que o pavimento de concreto, enquanto, em relação às emissões de CO₂, a solução asfáltica apresentou uma contribuição 15% inferior. Nos resultados obtidos na etapa de qualificação do método pelo *software* OpenLCA, o pavimento asfáltico também demonstrou pior desempenho em relação ao consumo energético e melhor sob a ótica da emissão de CO₂. Tratando da análise de impactos ambientais, os resultados gerados pelo OpenLCA indicaram um desempenho mais favorável ao pavimento asfáltico. Já na avaliação do custo de ciclo de vida, o pavimento de asfalto apresentou um preço total 2,3 vezes superior ao calculado para o pavimento de concreto. Ainda, o custo de emissão de carbono estimado apresentou pouca representatividade no valor total das estruturas, sendo 1,4% para o pavimento de asfalto e 3,8% para o de concreto. A presente pesquisa se configura como relevante contribuição para a tomada de decisão entre diferentes soluções construtivas ao quantificar de forma acessível parâmetros de impacto ambiental a partir de dados nacionalmente difundidos e que já integram os projetos de infraestrutura de transportes, como os do SICRO, além de agregar nova utilidade às composições de custos desse sistema.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; avaliação do custo do ciclo de vida; emissão de CO₂; consumo energético; monetização do carbono.

ABSTRACT

METHOD FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE SERVICES BASED ON SICRO DATA: COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN ASPHALT AND CONCRETE PAVEMENTS WITH CARBON EMISSION MONETIZATION

Author: Alice Amorim Teles

Advisor: Michele Tereza Marque Carvalho

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, November of 2024

Worldwide, there is a growing concern and importance attributed to sustainability, especially regarding a sector that has such a significant impact on the environment, such as transport infrastructure. Various financing initiatives already require proof of environmental performance for resource allocation, making this practice increasingly essential in the feasibility studies of enterprises. However, at the national level, the life cycle impact analysis of infrastructure projects faces challenges for its consolidation as a practice in the preparation and planning of projects due to a lack of data and a lack of knowledge about its development. Therefore, this study aims to present a practical and comprehensive life cycle assessment (LCA) method applicable to various elements of transportation infrastructure, utilizing data from budgets prepared with the Reference Cost System for Construction Works (SICRO), while also quantifying the costs associated with carbon emissions from these structures. To this end, the proposed method is divided into five steps: (i) defining the scope of the element under study, (ii) LCA based on SICRO data, (iii) qualification of the LCA obtained with SICRO data through modeling in the *OpenLCA software*, (iv) analysis of the life cycle cost (LCC) using the methodology prescribed in SICRO, and (v) calculation of the carbon emission cost. To demonstrate the proposed method, its application was developed to compare two pavement structures: one with an asphalt surface and the other with Portland cement concrete. The values obtained from SICRO data indicated that the asphalt pavement has an energy consumption 252% higher than that of concrete pavement, while regarding CO₂ emissions, the asphalt solution contributed 15% less. In the results obtained during the qualification phase of the method using the *OpenLCA software*, the asphalt pavement also showed worse performance concerning energy consumption and better performance in terms of CO₂ emissions. Regarding the analysis of environmental impacts, the results generated by *OpenLCA* indicated a more favorable performance for the asphalt pavement. In the life cycle cost assessment, the asphalt pavement showed a total price 2.3 times higher than that calculated for concrete pavement. Additionally, the estimated carbon emission cost was less significant in the total value of the structures, accounting for 1.4% for the asphalt pavement and 3.8% for the concrete pavement. This research represents a relevant contribution to decision-making among different construction solutions by quantifying environmental impact parameters in an accessible manner, using nationally disseminated data that is already integrated into transport infrastructure projects, such as those from SICRO, while also adding new utility to the cost compositions of this system.

Keywords: life cycle assessment; life cycle cost assessment; CO₂ emissions; energy consumption; carbon monetization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	2
1.1. JUSTICATIVA.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.3. DELIMITAÇÃO DO ESCOPO DO TRABALHO.....	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	9
2.2. AVALIAÇÃO DO CUSTO DE CICLO DE VIDA.....	13
2.3. ACV E ACCV NO ÂMBITO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES	14
2.4. MONETIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO.....	16
2.5. SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS	18
2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
3. MÉTODO	22
3.1. DEFINIÇÃO DE ESCOPO	23
3.2. ACV A PARTIR DE DADOS DO SICRO	24
3.2.1. Decomposição da CCU	25
3.2.2. Etapa de produção dos materiais	26
3.2.3. Etapa de operações de transporte.....	27
3.2.4. Etapa de atividades executivas dos equipamentos	29
3.2.5. Total do serviço	30
3.3. QUALIFICAÇÃO DA ACV OBTIDA COM OS DADOS DO SICRO	31
3.4. ACCV COM O SICRO	32
3.5. CUSTO DE EMISSÃO DE CARBONO	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1. DEFINIÇÃO DE ESCOPO DA ACV E ACCV	36
4.2. ACV COM A PARTIR DE DADOS DO SICRO.....	40
4.2.1. Decomposição da CCU	40
4.2.2. Etapa de produção dos materiais	41
4.2.3. Etapa de operações de transporte.....	43
4.2.4. Etapa de atividade executivas dos equipamentos	45
4.2.5. Total do serviço	46
4.3. QUALIFICAÇÃO DA ACV OBTIDA COM OS DADOS DO SICRO	54
4.4. ACCV COM O SICRO	60

4.5. CUSTO DE EMISSÃO DE CARBONO	65
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	69
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE A – Planilha de cálculo de CE_{pro} e ECO_{2pro} para todos as CCUs do exemplo de aplicação	81
APÊNDICE B – Planilha de cálculo de CE_{tra} e ECO_{2tra} para todos as CCUs do exemplo de aplicação	84
APÊNDICE C – Planilha de cálculo de CE_{exe} e ECO_{2exe} para todos as CCUs do exemplo de aplicação	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de uma ACV	10
Figura 2 - Representação genérica das etapas do ciclo de vida na ACV	13
Figura 3 - Países com mecanismos de crédito de carbono	17
Figura 4 - Valor em dólar da tonelada de carbono praticado por diferentes países (USD/tCO ₂)..	17
Figura 5 - Exemplo de CCU analítica divulgada no SICRO para o serviço de base de solo melhorado com cimento	19
Figura 6 - Fluxograma das atividades que compõem o método desta pesquisa	22
Figura 7 - Etapas do ciclo de vida passíveis de serem contempladas no método.....	24
Figura 7 - Exemplo de decomposição de CCU	26
Figura 9 - Etapas do ciclo de vida contempladas no exemplo de aplicação do método.....	36
Figura 9 - Semisseção do pavimento asfáltico e de concreto de cimento Portland, respectivamente (sem escala)	37
Figura 10 - Consumo energético por fase do ciclo de vida e por etapa de cálculo, respectivamente	50
Figura 11 - Emissão de CO ₂ por fase do ciclo de vida e por etapa de cálculo, respectivamente ..	51
Figura 12 - Consumo energético por insumo na etapa de produção dos materiais	52
Figura 13 - Emissão de CO ₂ por insumo na etapa de produção dos materiais.....	53
Figura 14 - Comparação entre os resultados obtidos pelo método com dados do SICRO e pelo <i>software</i> OpenLCA (consumo energético).....	55
Figura 15 - Comparação entre os resultados obtidos pelo método com dados do SICRO e pelo <i>software</i> OpenLCA (emissão de CO ₂).....	56
Figura 16 - Avaliação de impactos ambientais para os pavimentos de asfalto e de concreto	59
Figura 17 - ACCV das soluções de pavimento asfáltico e de concreto.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervenções de manutenção	38
Tabela 2 - Serviços e quantitativos por quilômetro de via para os pavimentos asfáltico e de concreto	39
Tabela 3 - Lista pós-decomposição da CCU do serviço 4011463.....	40
Tabela 4 - Valores de referência para EE e FCO ₂ adotados no exemplo de aplicação	42
Tabela 5 - Valores de CE _{pro} e ECO _{2pro} do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”	43
Tabela 6 - Distância médias e velocidades adotadas no estudo	43
Tabela 7 - Consumo de combustível no transporte do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”	44
Tabela 8 - Valores de CE _{tra} e ECO _{2tra} do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”	44
Tabela 9 - Consumo de combustível nas atividades executivas do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”	45
Tabela 10 - Valores de CE _{exe} e ECO _{2exe} do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”	46
Tabela 11 - Valores de CE _{tot} e ECO _{2tot} por serviço	47
Tabela 12 - Valores de CE _{tot} e ECO _{2tot} por quilômetro de solução-tipo.....	48
Tabela 13 - Valores de consumo energético e emissão de CO ₂ por etapa e fase para cada pavimento	50
Tabela 14 - Valores de consumo energético e emissão de CO ₂ por etapa e fase para cada pavimento	54
Tabela 15 - Comparação da representatividade por materiais para o método com dados do SICRO e pelo OpenLCA	57
Tabela 16 - Orçamento de construção e manutenção do pavimento asfáltico (referência: São Paulo - abril de 2024)	61
Tabela 17 - Orçamento de construção e manutenção do pavimento de concreto (referência: São Paulo - abril de 2024)	63
Tabela 18 - Resumo dos preços de construção e manutenção das soluções de pavimento asfáltico e de concreto.....	64

Tabela 19 - Definição da taxa de emissão de carbono adotada neste estudo	66
Tabela 20 - Dispêndios de construção, manutenção e emissão de CO ₂ das soluções de pavimento asfáltico e de concreto	66

LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACCV	Avaliação do custo de ciclo de vida
ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacto do ciclo de vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BDI	Benefícios e Despesas Indiretas
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
Cap _{equ}	Capacidade de carga do equipamento por viagem
CC _{exe}	Consumo de combustível nas atividades executivas dos equipamentos
CC _{tra}	Consumo de combustível nas operaes de transporte
CCU	Composição de custo unitário
CE	Consumo energético
CE _{exe}	Consumo energético do serviço nas atividades executivas dos equipamentos
CE _{pro}	Consumo energético do serviço na produo dos materiais
CE _{tot}	Consumo energético total do serviço
CE _{tra}	Consumo energético do serviço nas operaes de transporte
CMG	Custos médios gerenciais
CNT	Confederao Nacional do Transporte
CO ₂	Dixido de carbono
DMT	Distncia média de transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ECO ₂	Emissão de CO ₂
ECO _{2 pro}	Emissão de CO ₂ do serviço na produo dos materiais
ECO _{2 tra}	Emissão de CO ₂ do serviço nas operaes de transporte
ECO _{2 exe}	Emissão de CO ₂ do serviço nas atividades executivas dos equipamentos
ECO _{2 tot}	Emissão de CO ₂ total do serviço
EDP	Declaração ambiental de produto
EE	Energia embutida
EE _{comb}	Energia embutida do combustível
EE _{pro}	Energia embutida na produo do material
ET	Equipamento transportador
FC _{equ}	Coefficiente de consumo do equipamento
FCO ₂	Fator de emissão de CO ₂
FCO _{2 pro}	Fator de emissão de CO ₂ na produo do material
FCO _{2 tra}	Fator de emissão de CO ₂ do combustível
FCO _{2 exe}	Fator de emissão de CO ₂ do combustível
ICV	Análise de inventário do ciclo de vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
m	Massa do material no serviço

MCO ₂	Custo de emissão de CO ₂ do serviço
m _{tra}	Massa de transporte do item no serviço
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PECC	Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
P _{equ}	Potência do equipamento
PIB	Produto interno bruto
P _{ser}	Produção de equipe do serviço
Q _{equ}	Quantidade do equipamento no serviço
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obra
SIDAC	Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
TECO ₂	Taxa de emissão de CO ₂
UF	Unidade funcional
UnB	Universidade de Brasília
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática
UO _{equ}	Utilização operativa do equipamento no serviço
V _{equ}	Velocidade média do equipamento no transporte

INTRODUÇÃO



1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes é reconhecida internacionalmente como fator essencial para o desenvolvimento econômico e social de um país, uma vez que facilita o fluxo de bens, serviços e pessoas, conectando regiões, impulsionando o comércio e promovendo o crescimento das economias locais e nacionais.

No Brasil, entretanto, os investimentos públicos em infraestrutura têm apresentado queda desde 2014, acarretando a deterioração dos ativos existentes. O País possui um estoque de infraestrutura em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) de cerca de 34%, enquanto economias como Índia e China possuem estoques de infraestrutura de 58% e 76% do PIB, respectivamente (ABDIB, 2022). Segundo o *ranking* do Fórum Econômico Mundial, o país ocupava a 78ª posição em termos de competitividade relacionada à infraestrutura no ano de 2019 (WEF, 2019).

A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023) aponta que somente 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas e, dos 30.000 quilômetros de trilhos ferroviários, um terço está em situação de abandono. Das rodovias administradas pelo Estado, 67,5% são avaliadas como Regular, Ruim ou Péssima pelos usuários. O custo estimado de acidentes em razão das más condições das vias é de R\$ 13,4 bilhões, superior ao valor investido nesse setor. Além disso, o consumo desnecessário de combustível devido a problemas nas rodovias resultou em um gasto adicional de diesel estimado em 1,139 bilhões de litros, gerando o equivalente a 3,01 milhões de toneladas de CO₂ (CNT, 2023).

Para sanar os gargalos do setor de transportes e logística brasileiro, estima-se que seria necessário investir anualmente cerca de 2,26% do PIB, contudo, em 2021, o investimento foi de apenas 0,35% do PIB (ABDIB, 2022). Na contramão dessa necessidade, os investimentos públicos em infraestrutura têm apresentado queda desde 2014, acarretando a deterioração dos ativos existentes (ABDIB, 2022).

Diante desse cenário, é latente a importância de se empenhar recursos na infraestrutura de transportes do país, de modo que são projetados investimentos no setor da ordem de 20 a 30 bilhões de reais por ano para os próximos anos. Apenas para 2025, estima-se um montante de 31,3 bilhões de reais para transporte e logística, dos quais 13,1 bilhões se destinam somente ao modo rodoviário (ABDIB, 2022).

Visando o desenvolvimento socioeconômico sustentável, é importante que a pauta ambiental integre as discussões sobre os investimentos no setor, de modo que as soluções de engenharia também explorem atributos de sustentabilidade. Essa pauta ganha ainda mais relevância quando se observam os impactos da infraestrutura no meio ambiente. O relatório *Infrastructure for climate action* aponta que 79% das emissões totais de gases de efeito estufa são provenientes de obras de infraestrutura, sendo 16% relacionadas à infraestrutura de transportes (Thacker *et al.*, 2021). Ainda, o setor de transportes no Brasil respondeu por 35% do consumo de energia total do país (CNT, 2023).

Em 2015, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (UNFCCC) estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que consistem em metas globais da Agenda 2030 para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir paz e prosperidade para todos. Dentre eles, destaca-se o Objetivo 9, que aborda o desenvolvimento de infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente (ONU, 2024a).

Posto isso, é fundamental que o setor se debruce não somente na viabilidade técnica e econômica, mas também considere aspectos de sustentabilidade, com o objetivo de mitigar impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e o consumo energético. Sob esse prisma, as técnicas de avaliação do ciclo de vida (ACV) e de avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV) se destacam como ferramentas práticas e sistemáticas para análise ambiental e econômica das diferentes etapas do ciclo de vida de produtos ou serviços, contribuindo para mensurar impactos ambientais de maneira quantitativa (Di Domênico *et al.*, 2021).

1.1. JUSTIFICATIVA

Em todo o mundo, é crescente a preocupação e importância atribuídas à sustentabilidade, principalmente quando se trata de um setor com tanto impacto no meio ambiente como o da infraestrutura de transportes. Diversas iniciativas de financiamento passaram a exigir a comprovação do desempenho ambiental para fornecimento de recursos, de modo que essa prática tem se tornado cada vez mais essencial nos estudos de viabilidade dos empreendimentos.

O Brasil, juntamente com outros 194 países, comprometeu-se a cumprir o acordo global de combate aos efeitos das mudanças climáticas estabelecido na 21ª Conferência das Partes (COP-21) em

2015, o qual define metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa até 2025 e 2030 (ONU, 2024a).

Para que ocorra um desenvolvimento sustentável, é importante que a responsabilidade ambiental possa se amparar em políticas públicas com potencial de fomentar o setor. Nesse contexto, a avaliação do ciclo de vida se configura como uma ferramenta amplamente consolidada para a análise de aspectos de sustentabilidade em empreendimentos de infraestrutura de transportes, de modo que países como Suíça, Portugal e França já exigem a realização da ACV ainda nas fases preliminares de projeto para embasamento do processo de tomada de decisão (Saviotto, 2017).

Todavia, em âmbito nacional, ainda não há uma sistemática ou cultura consolidadas para a avaliação objetiva dos impactos referentes ao ciclo de vida de projetos de infraestrutura de transportes, ao passo que a quantidade de trabalhos nacionais que abordam a ACV nesse setor ainda não é expressiva. Paulsen e Sposto (2013), Machado (2020) e Di Domênico *et al.* (2021) apontam que o principal limitador na aplicação da ACV consiste na escassez ou mesmo ausência de dados. Nesse cenário, delinea-se uma necessidade latente de procedimentos que amparem e possibilitem o desenvolvimento da ACV ainda nas etapas de tomada de decisão dos projetos de infraestrutura no país.

O Sistema de Custos Referenciais de Obra (SICRO) surge como uma valiosa fonte de dados necessários à ACV, especialmente na esfera de investimentos públicos em infraestrutura. Isso porque esse sistema de custos é estabelecido Lei nº 14.133 (Brasil, 2021), em conjunto com o Decreto nº 7.983 (Brasil, 2013), como referência obrigatória para a estimativa de custos de obras públicas licitadas com recursos da União. Desse modo, grande parte dos projetos do setor já são necessariamente orçados por meio de composições de custos do SICRO, que por sua vez dispõem de informações úteis à quantificação da análise de inventário da ACV, como o consumo dos materiais e as características técnicas dos equipamentos empregados nos serviços.

Ainda, o estudo de aspectos de sustentabilidade em projetos de engenharia por intermédio da avaliação do ciclo de vida se insere na linha de pesquisa de Gestão e Sustentabilidade do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB), contribuindo para o avanço dos conhecimentos na área.

1.2. OBJETIVOS

Segundo Santero (2011a), a análise de inventário de saídas como o consumo energético e a emissão de CO₂ requer pouca tradução para serem entendidas por seu impacto, de forma que podem ser qualificadas como resultados da análise de impacto propriamente dita.

Nesse contexto, o objetivo geral desta pesquisa é descrever um método prático de aplicação da ACV por meio do cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂ dos serviços de obras de infraestrutura utilizando dados disponíveis no Sistema de Custos Referenciais de Obra (SICRO). A metodologia proposta pode ser replicada nos mais diferentes contextos e análises, servindo de guia para a incorporação de aspectos ambientais na tomada de decisão de investimentos em infraestrutura de transportes. Consequentemente, contribui para o desenvolvimento científico nacional, além de fomentar discussões sobre o tema e conferir nova aplicabilidade às composições de custos unitários do SICRO, as quais também passam a servir como entradas para avaliações ambientais.

Complementarmente ao objetivo principal desta pesquisa, são delimitados os seguintes objetivos específicos:

- Comparar pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland por meio da aplicação da ACV e ACCV utilizando dados do SICRO;
- Qualificar a ACV obtida com os dados do SICRO por meio do *software* OpenLCA;
- Contemplar a monetização das emissões de carbono na ACCV.

1.3. DELIMITAÇÃO DO ESCOPO DO TRABALHO

O escopo do trabalho desenvolvido nesta dissertação é delimitado pelas seguintes condições de contorno:

- O método proposto possibilita o cálculo do consumo energético e emissão do CO₂ apenas de serviços que constam do rol de composições de custos do SICRO;
- O modelo não considera as contribuições de impacto ambiental relativas à mão de obra direta e indireta da obra, instalação e operação do canteiro ou mobilização e desmobilização de pessoal e equipamentos;

- As contribuições derivadas da fabricação dos equipamentos não são consideradas diante da dificuldade de rateá-las nos diversos serviços nos quais os maquinários são empregados ao longo de suas vidas úteis;
- A fase de uso das infraestruturas construídas não é contemplada no método descrito;
- O exemplo de aplicação desenvolvido no estudo, o qual compara pavimentos asfáltico e de concreto, detém-se na análise dos elementos da estrutura dos pavimentos, não contemplando as contribuições relativas aos serviços de terraplenagem, drenagem, obras de arte corrente e sinalização;
- A água consumida nos serviços do SICRO, como nas misturas asfálticas e de concreto, não é contabilizada, uma vez que esse recurso não é explícito nas composições de custos;
- Alguns materiais com menor relevância em termos de contribuição em massa nos serviços foram desconsiderados nas etapas de produção e transporte devido à falta de valores de referência para energia embutida e fator de emissão. São eles: aditivo de cura para concreto, aditivo incorporador de ar, disco de corte diamantado, ponteiro para martetele, dente de corte e porta-dente para fresadora;
- Não foram contempladas as contribuições referentes aos tempos de carga, manobra e descarga dos materiais asfálticos e do óleo tipo A1, uma vez que o SICRO não considera composições de custos de tempos fixo desses insumos;
- O cálculo do custo de emissão de carbono adota condições médias baseadas nas práticas de outros países em razão da ausência de políticas de monetização nacionais.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho estrutura-se em cinco capítulos, conforme apresentado a seguir:

- **Capítulo 1 - Introdução:** introduz o tema do trabalho com o intuito de situar o leitor, bem como discute os principais aspectos que justificam a necessidade e relevância da pesquisa. Outrossim, delinea os objetivos geral e específicos propostos e delimita o escopo no qual o trabalho foi desenvolvido;
- **Capítulo 2 - Revisão da Literatura:** elucida os principais conceitos e assuntos necessários ao desenvolvimento do trabalho. Inicia-se definindo a avaliação do ciclo de vida e a avaliação do custo do ciclo de vida. Depois, contextualizam-se as principais pesquisas de ACV e ACCV no âmbito da infraestrutura de transportes. Em seguida, é abordada a monetização das emissões de CO₂ e apresentada uma explanação acerca do Sistema de Custos Referenciais de Obras. Por fim, são exibidas considerações finais sobre o tema do trabalho;
- **Capítulo 3 - Método:** exhibe e detalha o desenvolvimento do método deste trabalho, o qual se divide em: (i) definição de escopo; (ii) ACV a partir de dados do SICRO; (iii) qualificação da ACV obtida com os dados do SICRO; (iv) ACCV com o SICRO e (v) custo de emissão de carbono;
- **Capítulo 4 - Resultados e Discussões:** dispõe a aplicação da metodologia proposta para a comparação de duas estruturas de pavimento equivalentes no que tange ao volume de tráfego: uma em pavimento asfáltico e outra em pavimento de concreto de cimento Portland. O método é aplicado seguindo as mesmas etapas estruturadas no Capítulo 3, ao passo que os resultados são analisados e discutidos;
- **Capítulo 5 - Conclusão:** exhibe as conclusões mais relevantes obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Após o Capítulo 5, apresentam-se tanto o referencial bibliográfico consultado como os apêndices citados ao longo deste trabalho.

REVISÃO DA LITERATURA



2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos associados no estudo desta dissertação, estruturados nos seguintes tópicos:

- Avaliação do ciclo de vida;
- Avaliação do custo de ciclo de vida;
- ACV e ACCV no âmbito da infraestrutura de transportes;
- Monetização das emissões de carbono;
- Sistema de Custos Referenciais de Obras;
- Considerações finais.

2.1. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

O primeiro estudo significativo tratando da avaliação do ciclo de vida que se tem registro ocorreu nos Estados Unidos, ainda nos anos 60, mais especificamente em 1965, realizado pela Coca-Cola. O *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), como ficou conhecido, tinha como objetivo analisar as entradas e saídas do processo de fabricação das embalagens utilizadas pela empresa, visando principalmente a comparação no uso de envoltórios plásticos ou de vidro (Hunt e Franklin, 1996).

Na década de 70, a crise mundial de petróleo gerou desdobramentos pela disputa de suas reservas, despertando a necessidade de se explorar novas possibilidades para substituição da matriz energética baseada nesse recurso natural (Klöppfer, 1997). O impacto sentido ao nível global pela escassez do petróleo tornou palpável a condição finita dos recursos naturais explorados em larga escala pelo homem, o que fortaleceu a necessidade de se avaliar aspectos relacionados à sustentabilidade.

O final dos anos 80 foi marcado pelos primeiros grandes eventos científicos acerca da prática da ACV, alavancados pela pioneira *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) (Guinée, 2001).

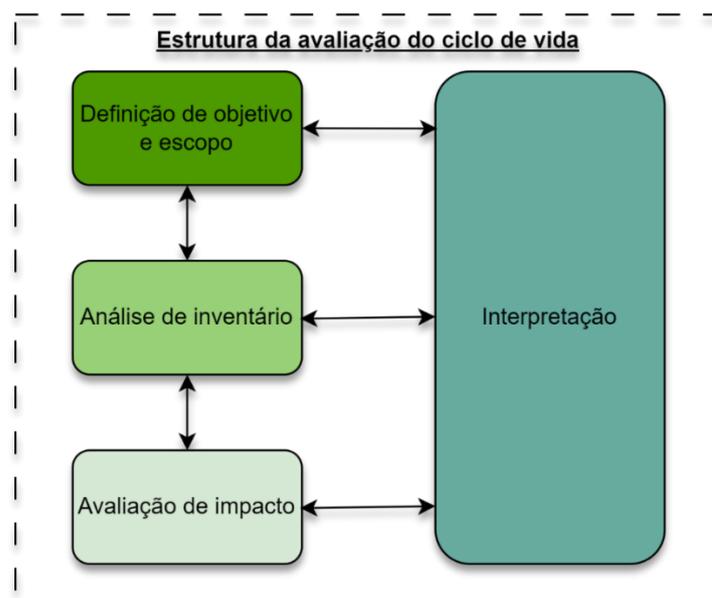
Buscando a padronização na prática da ACV, a *International Organization for Standardization* (ISO) publicou, em 1997, a norma ISO 14040, intitulada “*Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*”. Posteriormente, outras normas complementares foram desenvolvidas, culminando na publicação da ISO 14044 em 2006, a qual detalha os requisitos e orientações específicos para a execução de estudos de ACV, consolidando as diretrizes internacionais para a metodologia. No contexto brasileiro, esses normativos foram traduzidos sob as formas da ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e da ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

A ABNT NBR ISO 14040 define a avaliação do ciclo de vida como a “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (ABNT, 2009a).

Ainda, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2014) apresenta que a avaliação do ciclo de vida é uma importante ferramenta para medição de impactos ambientais, baseando-se em uma lista de fluxos de massa e energia de todas as etapas de determinado produto ou serviço. Esses impactos ambientais são estudados ao longo da vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima, passando por sua produção, uso e disposição (ABNT, 2009a).

A ABNT NBR ISO 14040, que apresenta princípios da avaliação do ciclo de vida, estabelece as quatro fases que estruturam uma ACV, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Fases de uma ACV



Fonte: Adaptado de ABNT (2009a).

Em relação à fase de **definição de objetivo e escopo**, é essencial que o objetivo seja claramente estabelecido, incluindo a aplicação pretendida, as justificativas para a realização do estudo e o público-alvo para o qual os resultados serão comunicados. Além disso, a definição do escopo da ACV deve abranger a descrição detalhada de elementos como: as funções do sistema ou produto analisado; a unidade funcional (UF) adotada; as fronteiras do sistema; a metodologia de análise de inventário; e os tipos de impactos ambientais que serão avaliados (ABNT, 2009b).

Tratando da unidade funcional, a ABNT (2009a) destaca que seu principal propósito é estabelecer uma referência que permita relacionar as entradas e saídas do sistema. Essa referência é essencial para garantir a comparabilidade dos resultados da ACV, especialmente quando diferentes sistemas estão sendo avaliados, assegurando que as comparações entre eles sejam realizadas de maneira consistente e uniforme.

Outro ponto de destaque consiste no estabelecimento das fronteiras do sistema, uma vez que elas definem os processos elementares a serem incluídos na análise (ABNT, 2009a). Essas fronteiras podem ser classificadas em:

- “Berço ao berço”: considera desde a extração das matérias-primas até a destinação dos resíduos, na condição deles serem incorporados à fase inicial de outros processos produtivos;
- “Berço ao túmulo”: considera todos os estágios do ciclo de vida do produto (da extração da matéria-prima ao descarte final);
- “Berço ao portão”: considera a extração das matérias-primas e processamento do material até sua finalização na indústria;
- “Portão ao portão”: considera apenas os processamentos dentro da indústria.

A **análise de inventário do ciclo de vida (ICV)**, por sua vez, envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ABNT, 2009a). A ABNT NBR ISO 14044 relaciona os procedimentos simplificados que compõem a ICV, tais como: coleta de dados; validação dos dados, correlação dos dados aos processos elementares e correlação dos dados à unidade funcional; e a agregação de dados (ABNT, 2009b). Em geral, essa é a fase que demanda o maior esforço na prática da ACV, especialmente devido à dificuldade envolvida na coleta e consolidação dos dados necessários.

Já a fase de **avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)** tem como objetivo compreender e analisar a magnitude e a relevância dos potenciais impactos ambientais de um sistema ao longo de todo o seu ciclo de vida (ABNT, 2009a). Essa fase determina a relevância relativa de cada item do inventário, permitindo que os resultados sejam sintetizados em um conjunto mais enxuto de indicadores. Isso facilita a interpretação dos dados e a tomada de decisões com base nos impactos mais significativos (Hauschild *et al.*, 2013).

Os métodos de AICV podem ser classificados em *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final). O modelo *midpoint* se concentra em medir os impactos ambientais em estágios intermediários dentro das cadeias de causa e efeito. Esses impactos são avaliados antes que se manifestem como danos finais específicos. Já o modelo *endpoint* caracteriza as consequências finais dos impactos ambientais, tais como saúde humana, qualidade do ecossistema e disponibilidade de recursos (Bare *et al.*, 2000).

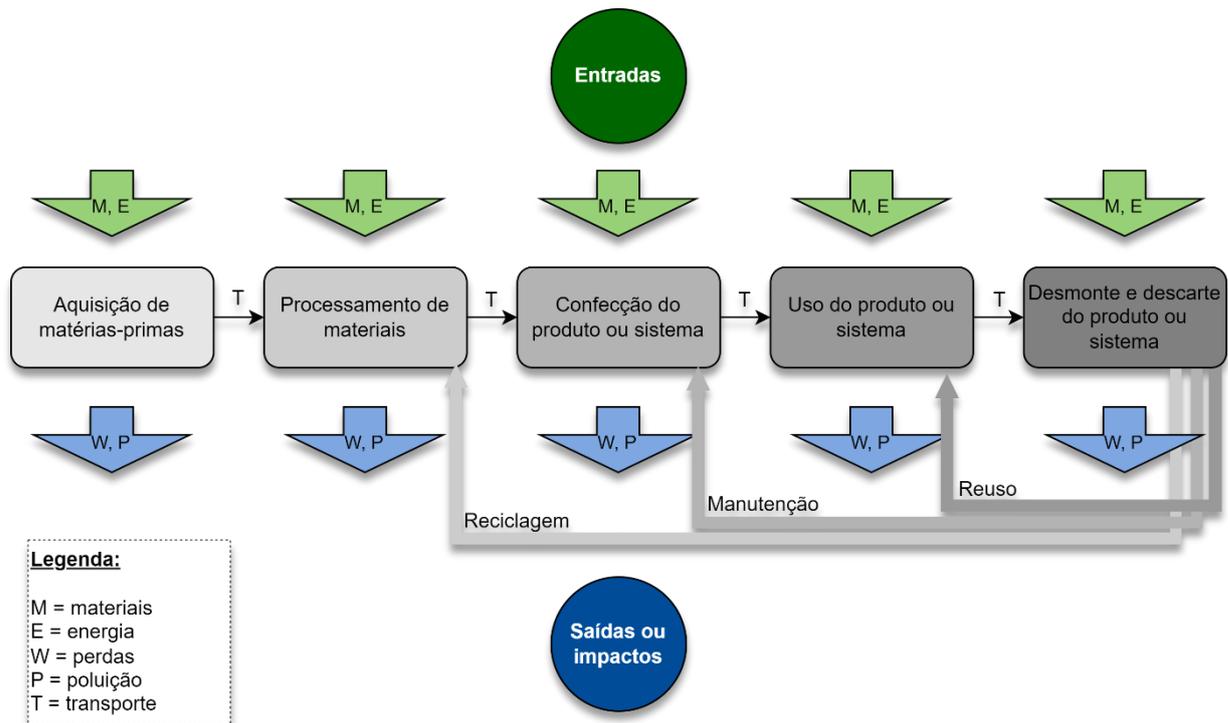
Por fim, a fase de **interpretação** é aquela na qual as constatações da ICV e/ou da AICV são avaliadas com relação ao objetivo e escopo definidos (ABNT, 2009a). A interpretação das etapas de uma ACV pode gerar análises divergentes, com variações na importância atribuída a diferentes aspectos ambientais. Isso acontece devido à complexidade da estrutura da ACV, que pode levar a simplificações na pesquisa (Carvalho e John, 2002).

Dentre as diversas finalidades da aplicação de uma ACV apresentadas por Walls III e Smith (1998) e Tavares (2006), destacam-se:

- Identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de produtos e sistemas em diferentes pontos de seu ciclo de vida;
- Orientar escolhas de projeto e *design* de produtos;
- Comparar características de desempenho ambiental de diferentes produtos;
- Apoiar a avaliação e desenvolvimento de políticas públicas e legislações ambientais.

A ACV abrange as entradas e saídas em todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a obtenção das matérias-primas, passando pelo processamento dos materiais e fabricação do produto, até seu uso e descarte ao final da vida útil. Nesse sentido, a Figura 2 apresenta uma representação genérica das etapas do ciclo de vida de um produto.

Figura 2 - Representação genérica das etapas do ciclo de vida na ACV



Fonte: Adaptado de Kendall (2012).

2.2. AVALIAÇÃO DO CUSTO DE CICLO DE VIDA

A avaliação do custo do ciclo de vida é uma abordagem que vai além da análise dos custos iniciais de um produto, considerando os dispêndios totais ao longo de sua vida útil. É uma metodologia que permite avaliar e comparar diferentes alternativas com base nos custos incorridos durante as fases de aquisição, operação, manutenção e descarte (FHWA, 2002).

No âmbito de obras de engenharia, a ACCV se revela como uma técnica eficaz para avaliar alternativas de projeto que atendem a um mesmo padrão de desempenho, porém diferem em termos dos custos iniciais de implantação e dos custos oriundos de manutenções periódicas necessárias às condições de desempenho durante sua vida útil (Costa, 2008).

De acordo com Berliner (1992), a quantificação do custo do ciclo de vida de um produto mostra-se necessária para:

- Definir um quadro mais claro da rentabilidade do produto a longo prazo;
- Mostrar a eficiência do planejamento do ciclo de vida;
- Quantificar o impacto de custos da alternativa escolhida durante a fase de *desing*;
- Atribuir os custos de tecnologia para os produtos que a utilizam.

Assim, é fundamental acumular os custos dos produtos ao longo de seu ciclo de vida para obter uma visão abrangente da rentabilidade a longo prazo. Esse processo também apoia decisões estratégicas relacionadas à linha de produtos, participação de mercado e política de preços (Beuren e Schaeffer, 1997).

2.3. ACV E ACCV NO ÂMBITO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

Os primeiros estudos de ACV voltados à infraestrutura de transportes datam de meados dos anos 90. Essas análises abordam majoritariamente sistemas de pavimento de rodovias, superestruturas ferroviárias e obras de arte especiais, como pontes, viadutos e túneis.

A principal finalidade de aplicação da ACV na área de infraestrutura de transportes se volta para o subsídio de informações na tomada de decisões no investimento de soluções de engenharia sob o aspecto da sustentabilidade. Há ainda um elevado número de pesquisas voltadas para a análise de novos materiais na construção dessas estruturas.

Roudebush (1996) foi o primeiro autor a comparar, sob os aspectos da sustentabilidade, rodovias de asfalto e concreto de cimento Portland por meio da aplicação da ACV. Nas décadas seguintes, diversos trabalhos se valeram da avaliação do ciclo de vida para estudar os impactos oriundos de infraestruturas de pavimento flexível e rígido, como Horvath e Hendrickson (1998), Park *et al.* (2003) e Zapata e Gambatese (2005).

Santero *et al.* (2011) sintetizam as condições de contorno, metodologias e resultados obtidos em 15 estudos de análise de ciclo de vida de pavimentos. Os autores constatam que a comparação mais recorrente nesses trabalhos envolve pavimentos de asfalto e de concreto, uma vez que essas são as alternativas mais utilizadas para pavimentação e representam as principais opções de materiais concorrentes.

Mesmo com uma elevada quantidade de trabalhos que comparam o uso de pavimentos asfáltico e de concreto, Santero *et al.* (2011) reforçam que as diferenças nas fronteiras dos sistemas e unidades funcionais adotadas tornam temerária a extrapolação dos resultados obtidos nesses estudos. Além disso, Santero *et al.* (2011) relatam que as ACVs de pavimentos se concentram majoritariamente sobre resultados do consumo energético e emissão de CO₂, uma vez que esses indicadores já conferem resultados diretos sobre o impacto das estruturas analisadas.

Liu *et al.* (2018) avaliaram as emissões de CO₂ oriundas de infraestruturas de transportes na China compostas por pavimento e obras de arte especiais (túneis e pontes) utilizando planilhas de cálculo no *software* Excel. Além das etapas de extração e produção dos materiais, construção e manutenção, os autores consideraram as contribuições dos usuários nas infraestruturas.

Já Boonpoke *et al.* (2018) avançaram até a etapa de demolição e descarte para analisar o impacto de ciclo de vida de pavimentos rígido e flexível na Tailândia por meio do *software* SimaPro.

Buscando avaliar o uso de novos materiais e tecnologias na pavimentação, Gulotta *et al.* (2019) desenvolveram uma avaliação de impactos ambientais por meio da ACV no contexto de rodovias urbanas na Itália.

Nos Estados Unidos, Sharifi *et al.* (2021) consideraram as etapas de extração e produção dos materiais, construção, manutenção e uso das infraestruturas para avaliar o impacto de diferentes projetos de rodovia nas emissões de CO₂ resultantes na região, além de comparar os custos dessas soluções por meio da ACCV.

No Brasil, Graef *et al.* (2021) abordaram a lacuna de dados acerca da análise de impacto no ciclo de vida de construção de rodovias no país e determinaram os impactos ambientais associados a duas rodovias de pavimento asfáltico por meio do *software* OpenLCA, considerando a extração e produção dos materiais e atividades de construção do revestimento. Ainda no contexto brasileiro, Luvizão e Trichês (2023) comparam o desempenho ambiental de três rodovias diante da aplicação de diferentes métodos de restauração e conservação em duas vidas de serviço, também por meio do OpenLCA.

Di Domênico *et al.* (2021) destacam que a ACV pode ser utilizada para comparar diferentes materiais usados no ciclo de vida de uma estrutura de pavimento, identificando a origem das maiores contribuições para tais impactos.

Autores como Zhou *et al.* (2022) utilizam a ACV para comparar projetos de infraestrutura concebidos com diferentes soluções construtivas sob a luz de parâmetros relacionados a impactos ambientais. Essa avaliação permite comparar diferentes opções de pavimentos (como concreto, asfalto, blocos intertravados, entre outros) e identificar aquela que apresenta o menor impacto ambiental ao longo de sua vida útil. Além disso, também pode

auxiliar na tomada de decisões relacionadas à escolha de materiais, técnicas de construção e práticas de manutenção que possam contribuir para a sustentabilidade dos pavimentos.

Autores como Kumari *et al.* (2022) e Krishna e Kumar (2022) adotaram a ACCV para conceber um quadro econômico diante de diferentes soluções de pavimentação, atrelando também aspectos ambientais como a emissão de gases de efeito estufa e de carbono equivalente.

Celauro *et al.* (2023) aplicaram a ACV e ACCV em cinco alternativas de infraestrutura ferroviária na Itália com diferentes materiais e métodos construtivos, considerando as etapas de extração e produção dos materiais, construção e manutenção das infraestruturas.

Aryan *et al.* (2023) realizaram um mapeamento sistemático da literatura com 67 estudos de ACV no âmbito da infraestrutura de transportes. Dentre os resultados relatados pelos autores, destaca-se que apenas 20% desses trabalhos foram desenvolvidos para países em desenvolvimento. Além disso, 76% dos estudos analisados consideram apenas as etapas de extração, produção dos materiais e construção das infraestruturas, avaliando os impactos no que tange ao potencial de aquecimento global e demanda energética. Outra conclusão relevante dos autores consiste na dificuldade e dependência de dados secundários para a análise de inventário do ciclo de vida nos estudos.

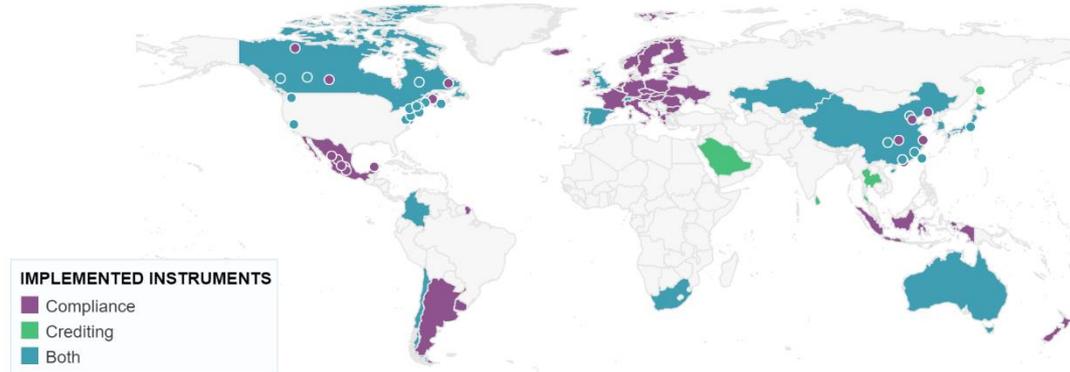
2.4. MONETIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO

A monetização do CO₂ tem como objetivo incentivar ações e investimentos que acarretam a redução das emissões de carbono e a mitigação das mudanças climáticas. Ao atribuir um valor financeiro às emissões, cria-se um incentivo econômico para adotar práticas mais sustentáveis e buscar soluções de baixo carbono. Isso contribui para a transição de uma economia mais verde e ajuda a alcançar metas de redução de emissões ao nível global (World Bank, 2024a).

Sua função é incorporar os custos externos da emissão de carbono, os quais se referem às despesas suportadas pelo poder público, como perdas de propriedade devido ao aumento do nível do mar, danos às plantações causados por alterações nos padrões de chuva e despesas com saúde associadas a ondas de calor e secas. Portanto, busca-se internalizar esses custos, fazendo com que sejam atribuídos à sua fonte de origem (ONU, 2024).

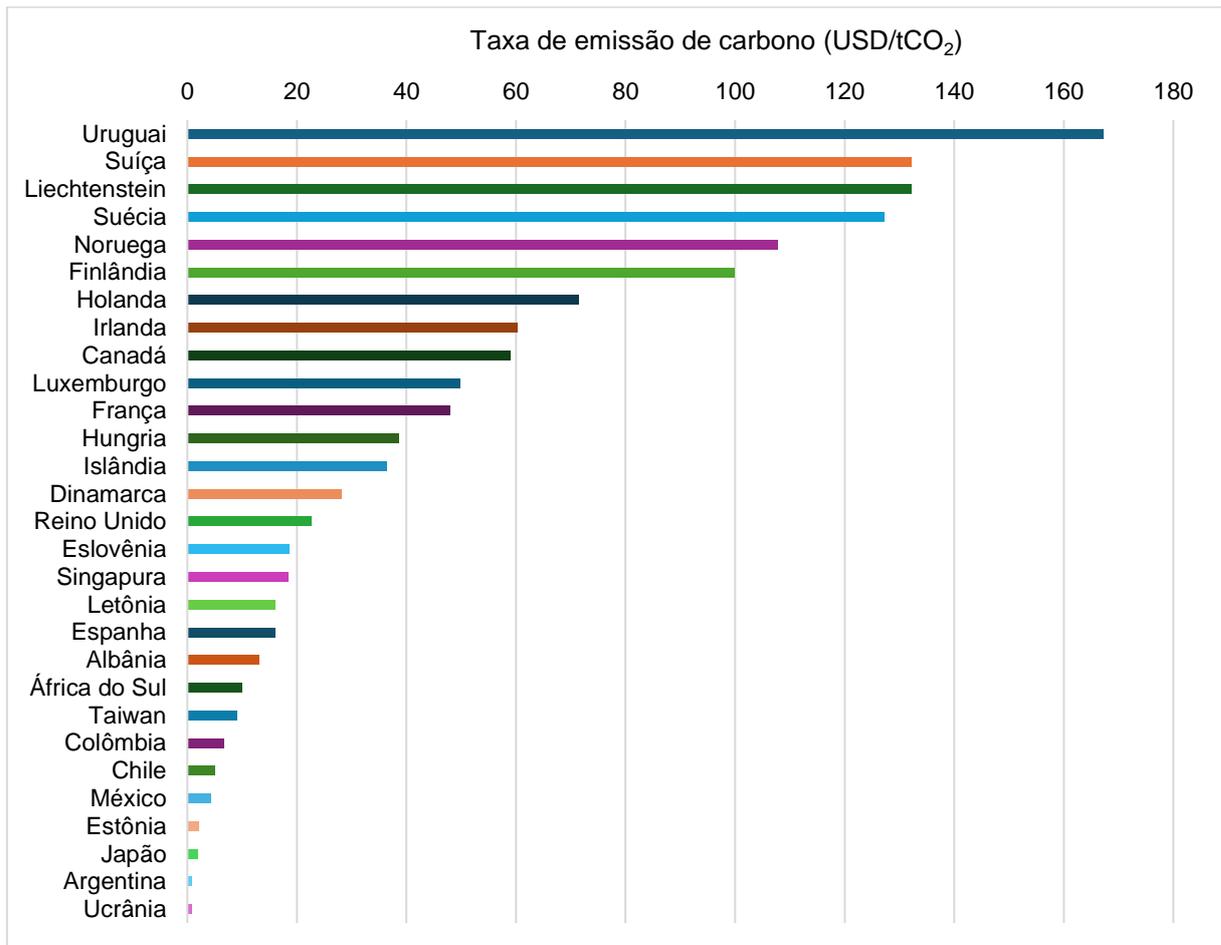
Nesse contexto, a Figura 3 apresenta os países que já adotam mecanismos de crédito de carbono ou estão em processo de desenvolvimento.

Figura 3 - Países com mecanismos de crédito de carbono



Fonte: World Bank (2024b)

O valor atribuído à tonelada de carbono emitido varia significativamente entre os países, de acordo com as políticas adotadas. A Figura 4 apresenta o valor por tonelada de carbono em dólares praticado em 2024 por diferentes países.

Figura 4 - Valor em dólar da tonelada de carbono praticado por diferentes países (USD/tCO₂)

Fonte: Adaptado de World Bank (2024b).

da construção, diversos autores já incorporam a monetização das emissões de carbono nas avaliações de ciclo de vida, visando contemplar esse custo ambiental. Bostanci *et*

al. (2018) examinaram os custos de emissão de CO₂ para concretos com uso de agregado reciclado. Chou e Yeh (2015) consideraram os custos de emissão de carbono para comparar o uso diferentes métodos construtivos (pré-fabricado e moldado *in loco*) no setor da construção. Luo *et al.* (2021) e Gao (2017) se valeram dos sistemas de comércio de carbono para propor modelos que integram esses custos à construção de empreendimentos. Já Luo *et al.* (2021) analisaram as emissões de carbono geradas durante o ciclo de vida de edifícios, contabilizando-as a partir de diferentes sistemas de precificação do carbono.

Os trabalhos previamente citados, assim como a maior parte dos estudos de monetização das emissões de carbono encontrados na construção, desenvolvem suas análises para edificações. No âmbito da infraestrutura de transportes, Wang *et al.* (2022) elabora um modelo de cálculo do custo de emissão de CO₂ para a construção de uma ponte por meio da combinação de sistemas de precificação do carbono.

2.5. SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS

O SICRO consiste em um sistema de custos referenciais para a estimativa de preço de obras e serviços de engenharia voltados para a infraestrutura de transportes, abarcando os modos rodoviário, ferroviário e hidroviário. O seu cerne fundamenta-se na remuneração dos serviços de obra a partir da associação dos quantitativos extraídos do projeto do empreendimento às composições de custos unitários (CCUs) constantes do sistema.

A CCU, por sua vez, é uma ferramenta que permite definir, de forma qualitativa e quantitativa, os insumos necessários à realização de determinado serviço. As quantidades dos insumos (mão de obra, equipamentos, materiais, atividades auxiliares e transportes), ponderados por seus custos e/ou preços unitários, quando acrescidos da parcela de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI), resultam no preço unitário do serviço (DNIT, 2017).

Conforme citado no capítulo de introdução, esse sistema de custos desempenha forte protagonismo no Brasil, uma vez que é estabelecido pela Lei nº 14.133 (Brasil, 2021), em conjunto com o Decreto nº 7.983 (Brasil, 2013), como referência obrigatória para a estimativa de custos de obras públicas de infraestrutura de transportes licitadas com recursos da União.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é a autarquia responsável pela manutenção e divulgação das mais de 6.500 CCUs do SICRO, a qual é feita em seu sítio eletrônico com periodicidade trimestral. Entre os documentos publicados regularmente, destaca-se o relatório analítico de composições de custos, o qual detalha os itens de formação de

cada CCU e suas respectivas quantidades. As composições de custos dispõem de seis parcelas: “A - Equipamentos”, “B - Mão de obra”, “C - Materiais”, “D - Atividades auxiliares”, “E - Tempo fixo” e “F - Momento de transporte”, conforme demonstrado no exemplo da Figura 5.

Figura 5 - Exemplo de CCU analítica divulgada no SICRO para o serviço de base de solo melhorado com cimento

CGCIT							DNIT		
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO				São Paulo		FIC 0,02718			
Custo Unitário de Referência				Abril/2024		Produção da equipe		150,88 m³	
4011287 Base de solo melhorado com 3% de cimento e mistura na pista com material de jazida									Valores em reais (R\$)
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total		
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo			
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,83	0,17	319,1285	84,3165		279,2105	
E9518	Grade de 24 discos rebocável de D = 60 cm (24")	1,00000	0,62	0,38	4,7406	3,3013		4,1937	
E9524	Motoniveladora - 93 kW	1,00000	1,00	0,00	282,4143	124,5782		282,4143	
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,86	0,14	250,1183	123,1297		232,3399	
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,90	0,10	214,2578	97,0703		202,5391	
E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	1,00000	0,62	0,38	145,0515	54,4398		110,6191	
					Custo horário total de equipamentos			1.111,3166	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total			
P9824	Servente	6,00000	h	27,2808				163,6848	
					Custo horário total de mão de obra		163,6848		
					Custo horário total de execução		1.275,0014		
					Custo unitário de execução		8,4504		
					Custo do FIC		0,22970		
					Custo do FIT		-		
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário			
M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	61,89000	kg	0,5524				34,1880	
					Custo unitário total de material		34,1880		
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário			
4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	1,06726	m³	1,3700				1,4621	
					Custo total de atividades auxiliares		1,4621		
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³ - Caminhão basculante 10 m³	5914354	2,00111	t	1,8100		3,6220		
M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco - Caminhão carroceria 15 t	5914655	0,06189	t	35,8500		2,2188		
					Custo unitário total de tempo fixo		5,8408		
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário		
				LN	RP	P			
4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³ - Caminhão basculante 10 m³	2,00111	tkm	5914359	5914374	5914389			
M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco - Caminhão carroceria 15 t	0,06189	tkm	5914449	5914464	5914479			
					Custo unitário total de transporte		50,17		
					Custo unitário direto total		50,17		
Obs.									

Fonte: DNIT (2024).

Diferentemente de ferramentas paramétricas de estimativa de custos como o RSMeans dos Estados Unidos, por exemplo, que se concentra essencialmente na divulgação direta dos preços de serviços e insumos (RSMeans, 2024), a natureza analítica do SICRO permite que seus relatórios avancem para além do custo de um serviço, incluindo dados técnicos detalhados, como a produção da equipe, o consumo e a massa dos materiais, a potência e capacidade dos equipamentos. Assim, o SICRO se torna uma valiosa e abrangente fonte de referência técnica para diversos estudos e análises.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de aspectos relacionados ao desempenho ambiental de intervenções construtivas se tornou imperativa no mundo moderno, principalmente devido à acelerada degradação do meio ambiente causada pela ação humana nos últimos séculos.

Dentre as intervenções construtivas que requerem esse tipo de atenção, a infraestrutura de transportes destaca-se por desempenhar grande impacto no meio ambiente. Não obstante, o Brasil ainda carece de sistemáticas inseridas no contexto das políticas públicas para a tomada de decisão de projetos de infraestrutura sob a ótica da sustentabilidade.

Assim, a possibilidade de associar esse tipo de análise ao processo de orçamentação com um sistema de custos difundido como o SICRO tem o potencial de impulsionar a prática da ACV no setor da infraestrutura no País.

No tocante à monetização das emissões de carbono, as pesquisas bibliográficas demonstraram dois pontos de atenção. O primeiro se refere à incipiência de trabalhos que aplicam esse conceito no setor da infraestrutura, sendo a maior parte dos estudos voltados à construção civil de edificações residenciais. O segundo ponto diz respeito à ausência de mecanismos de crédito de carbono no Brasil reconhecidos pelo Banco Mundial. Tais questões reforçam a necessidade de avanço das discussões sobre a monetização do carbono em cenário nacional.

MÉTODO

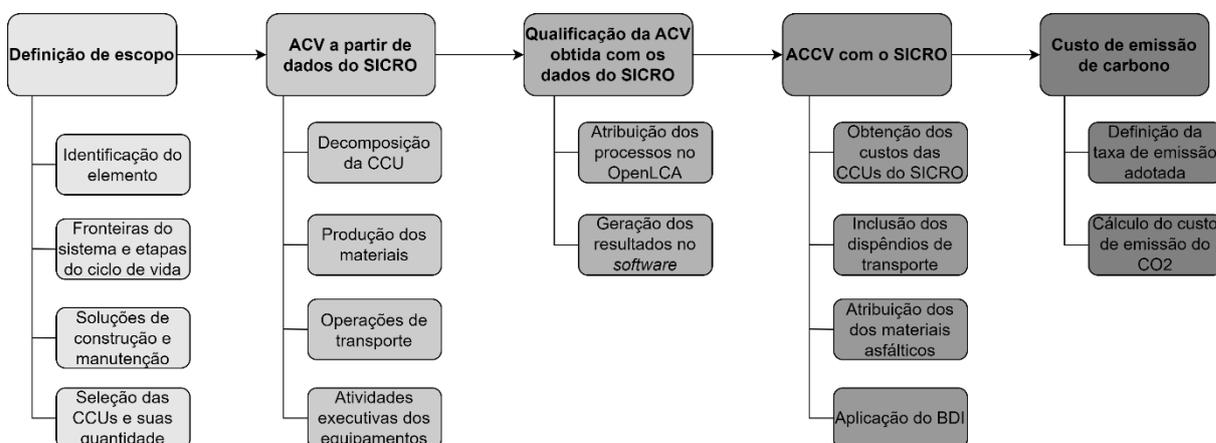


3. MÉTODO

Visando os objetivos delimitados, o método desta pesquisa divide-se nas seções descritas a seguir e apresentadas no fluxograma da Figura 6:

- **Definição de escopo:** consiste na escolha do elemento de estudo da ACV e ACCV e consequente seleção das composições de custos do SICRO que melhor representam sua construção e manutenção ao longo do ciclo de vida;
- **ACV a partir de dados do SICRO:** descrição das etapas a serem seguidas para quantificação do consumo energético e da emissão de CO₂ de serviços de obras a partir de dados divulgados no SICRO;
- **Qualificação da ACV obtida com os dados do SICRO:** visando a validação dos valores quantificados a partir dos dados do SICRO por meio da metodologia proposta, aplica o processo de modelagem da ACV utilizando o *software* OpenLCA;
- **ACCV com o SICRO:** consiste na avaliação do custo do ciclo de vida, a partir da metodologia preconizada no SICRO, de empreendimentos de infraestrutura de transportes passíveis de serem expressos por meio de composições de custos desse sistema referencial de custos;
- **Custo de emissão de carbono:** descreve o processo de estimativa dos custos relacionados à emissão de carbono do objeto de análise.

Figura 6 - Fluxograma das atividades que compõem o método desta pesquisa



Fonte: De autoria própria.

3.1. DEFINIÇÃO DE ESCOPO

A avaliação do ciclo de vida requer a definição clara do escopo da análise, uma vez que a profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente dependendo do objetivo do estudo (ABNT, 2009a). Nesse sentido, torna-se imperativo neste método o esclarecimento das condições de contorno e fronteiras do elemento analisado.

Posto isso, a definição de escopo do método pode ser descrita pelas seguintes etapas:

- Identificação do elemento de análise e fronteiras do sistema, tais como as fases do ciclo de vida consideradas;
- Definição das soluções de construção, intervenções de manutenção da estrutura ao longo da vida de serviço e meios de descarte;
- Seleção das composições de custos e respectivos quantitativos que melhor representam as soluções em análise.

Considerando que parte dos dados que permitem a aplicação deste método advêm das composições de custos do SICRO, é fundamental que a etapa de definição de escopo foque na designação das composições de custos que representam a execução do elemento analisado. Nesse ponto, é essencial analisar as estruturas analíticas das CCUs disponíveis no SICRO, visando sua validação e a identificação de possíveis itens que requerem adaptação.

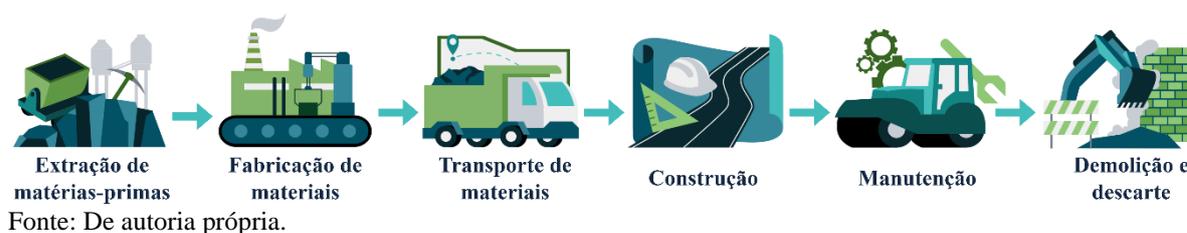
Além das etapas descritas acima, é essencial estipular a unidade funcional da ACV. No âmbito desta metodologia, a UF consiste na própria unidade de medida das composições de custos unitários dos serviços constantes do SICRO. Não obstante, as análises desenvolvidas diante da aplicação do método têm o potencial de comparar não apenas um serviço específico, mas diversas estruturas e elementos, desde que eles possam ser descritos como um conjunto de composições de custos.

A título de exemplificação, citam-se as possíveis análises sobre a composição de custos “4011463 - Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais”. Ao aplicar, de forma direta, a presente metodologia, são obtidos o consumo energético e as emissões de CO₂ relativos a uma tonelada de concreto asfáltico, que é a unidade de medida dessa CCU. Todavia, é possível estabelecer a quantidade de concreto asfáltico empregado por quilômetro de pavimento para obtenção da ACV do revestimento asfáltico nessa extensão.

3.2. ACV A PARTIR DE DADOS DO SICRO

A ACV proposta no método deste estudo visa calcular o consumo energético e a emissão de CO₂ de serviços de infraestrutura de transportes a partir de dados SICRO. O método pode ser aplicado considerando as etapas do ciclo de vida representadas na Figura 7, destacando-se, contudo, que não abrange a quantificação na fase de uso e operação da infraestrutura.

Figura 7 - Etapas do ciclo de vida passíveis de serem contempladas no método



Dito isso, a sequência de cálculo estabelecida nesta metodologia se apresenta da seguinte forma:

- **Decomposição da CCU:** consiste em etapa anterior ao cálculo, necessária para a obtenção da lista de itens do inventário;
- **Produção dos materiais:** contempla as atividades de extração de matérias-primas, processamentos e transportes na linha de produção necessários à confecção dos materiais consumidos no serviço;
- **Operações de transporte:** envolvem as diferentes atividades de transporte dos materiais após sua produção (*e.g.* transporte da fábrica ao canteiro de obras e do canteiro de obras à frente de serviço), bem como o transporte das atividades auxiliares das composições de custos, conforme o momento de transporte da CCU (*e.g.* transporte da mistura asfáltica produzida em canteiro até a frente de serviço);
- **Atividades executivas dos equipamentos:** retratam a atuação das patrulhas mecânicas utilizadas no serviço.

Diante do exposto, das seis parcelas que compõem as composições de custos unitários do SICRO, este método utiliza as seguintes: A - Equipamentos, C - Materiais, D - Atividades auxiliares, E - Tempo fixo e F - Momento de transporte.

Salienta-se que as equações apresentadas neste trabalho para quantificação do consumo energético e emissão de CO₂ foram desenvolvidas sob a luz dos conceitos estabelecidos na ABNT NBR ISO 14044, de avaliação do ciclo de vida (ABNT, 2009b).

3.2.1. Decomposição da CCU

A etapa de decomposição da CCU visa listar todos os equipamentos, materiais e momentos de transporte que integram o serviço direta ou indiretamente, de modo que os consumos energéticos e as emissões de CO₂ sejam devidamente calculados. A motivação desta etapa surge do fato de as atividades auxiliares (parcela D) e o tempo fixo (parcela E) serem considerados na CCU principal por meio de composições de custos, representando atividades necessárias à execução do serviço não modeladas nas parcelas A e C. Em que pese o momento de transporte (parcela F) também ser definido por composições de custos, o cálculo de seus consumos energéticos e emissões de CO₂, no âmbito deste método, não requer sua decomposição.

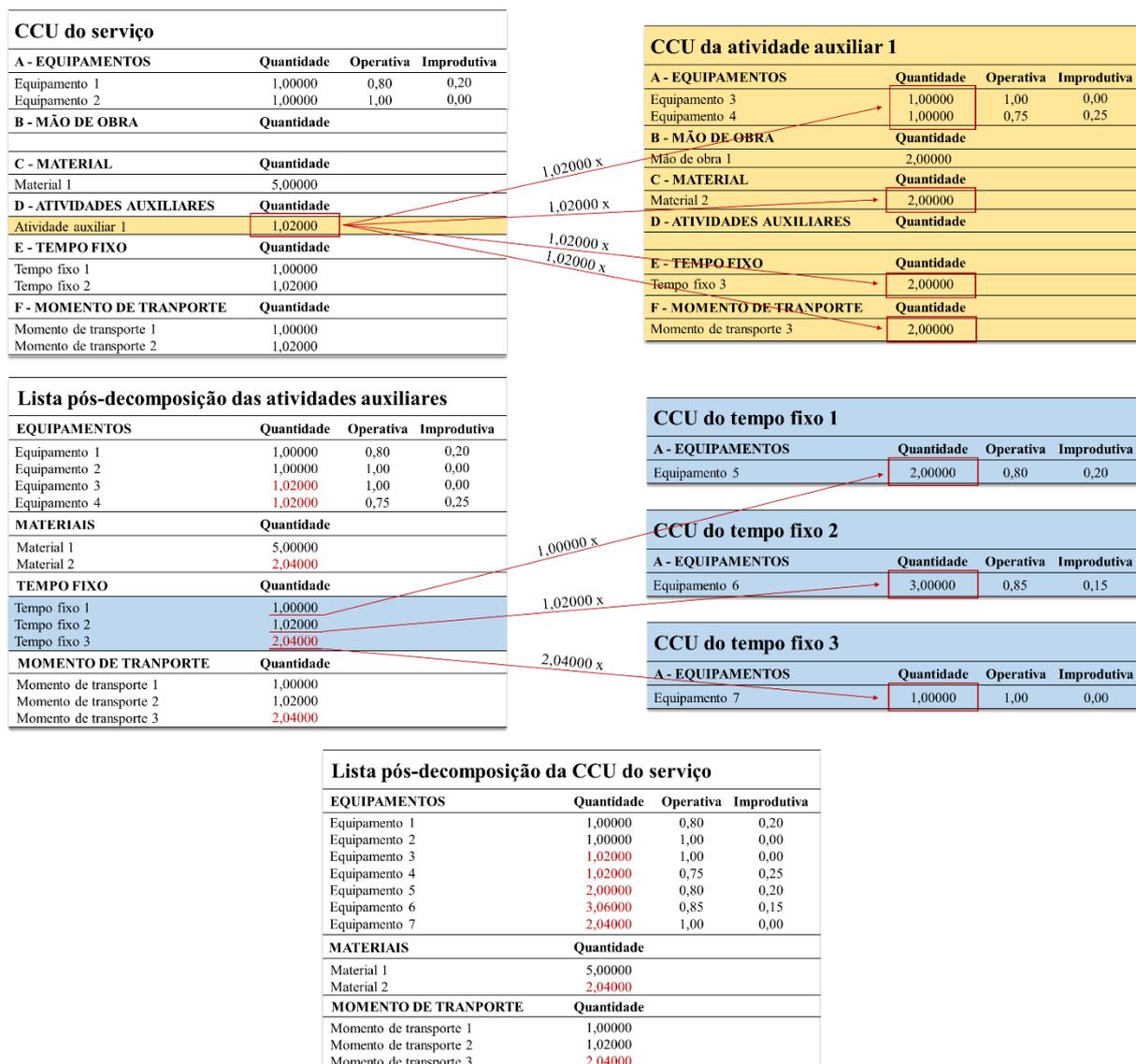
Uma vez que as atividades auxiliares também são CCUs, sua decomposição consiste basicamente em apropriar seus respectivos consumos e emissões na produção de materiais, operações de transportes e atividades executivas dos equipamentos. Para tanto, as quantidades da composição de custos da atividade auxiliar são multiplicadas pela sua quantidade na CCU principal. Se a atividade auxiliar também possuir atividades auxiliares, o mesmo procedimento deve ser adotado, e assim sucessivamente.

Na sequência, a decomposição do tempo fixo é abordada de maneira similar, de modo que as quantidades resultantes na lista pós-decomposição das atividades auxiliares são multiplicadas pelas quantidades dos equipamentos de suas respectivas composições de custos de tempo fixo.

Ao final desse processo, obtém-se uma lista contendo todos os equipamentos, materiais e momentos de transporte que de fato integram o serviço, seja na composição de custos do principal, seja nas composições de atividades auxiliares e de tempo fixo.

A Figura 8 exemplifica os procedimentos descritos para a decomposição da CCU.

Figura 8 - Exemplo de decomposição de CCU



Fonte: De autoria própria.

3.2.2. Etapa de produção dos materiais

O consumo energético e a emissão de CO₂ resultantes da produção dos materiais são obtidos pelo somatório dos produtos entre as massas dos materiais (por unidade do serviço) e os fatores de energia embutida e de emissão de CO₂, conforme demonstrado nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$CE_{pro} = \sum EE_{pro,i} \times m_i \quad (\text{Equação 1})$$

$$ECO_2_{pro} = \sum FCO_2_{pro,i} \times m_i \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

CE_{pro} consumo energético do serviço na produção dos materiais (MJ/UF);

EE_{pro} energia embutida na produção do material (MJ/t);

m massa do material no serviço (t/UF);

ECO_2_{pro} emissão de CO₂ do serviço na produção dos materiais (kgCO₂/UF);

FCO_2_{pro} fator de emissão de CO₂ na produção do material (kgCO₂/t).

A massa “m” é extraída diretamente da lista pós-decomposição da CCU do serviço. Já a energia embutida “EE_{pro}” e o fator de emissão de CO₂ “FCO₂_{pro}” relacionados à produção dos materiais devem ser obtidos por meio de pesquisa bibliográfica, bases especializadas ou estimativas próprias, priorizando dados nacionais com o intuito de melhor representar a realidade do objeto analisado.

3.2.3. Etapa de operações de transporte

As operações de transporte necessárias para o deslocamento de materiais e atividades auxiliares empregadas em determinado serviço variam de acordo com as distâncias médias de transporte (DMTs) do projeto, o tipo de equipamento transportador e a quantidade de material transportado.

Inicialmente, calcula-se o consumo de combustível nas operações de transporte, conforme demonstrado na Equação 3.

$$CC_{tra} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{v_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

CC_{tra} consumo de combustível nas operações de transporte (l/UF);

FC_{equ} coeficiente de consumo do equipamento (l/kWh);

P_{equ} potência do equipamento (kW);

DMT_{equ} distância média de transporte (km);

v_{equ}	velocidade média do equipamento no transporte (km/h);
m_{tra}	massa de transporte do item no serviço (t/UF);
Cap_{equ}	capacidade de carga do equipamento por viagem (t).

Os dados referentes ao coeficiente de consumo “ FC_{equ} ”, à potência “ P_{equ} ” e à capacidade de carga “ Cap_{equ} ” são obtidos no Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos (DNIT, 2024a), divulgado trimestralmente pelo DNIT no âmbito do SICRO, ao passo que a velocidade média “ v_{equ} ” dos equipamentos no transporte é informada no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes, Volume 01 (DNIT, 2017). A distância média “ DMT_{equ} ” consiste na distância entre os pontos de origem e destino no transporte de materiais e atividades auxiliares, devendo ser definida caso a caso de acordo com a logística do projeto. Já a massa de transporte “ m_{tra} ” consta na lista pós-decomposição da CCU do serviço.

Então, o cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂ relacionados às operações de transporte é realizado pelo somatório dos produtos entre o consumo de combustível e os valores de energia de embutida e de emissão de CO₂ dos combustíveis (diesel e gasolina, principalmente), de acordo com as Equações 4 e 5, respectivamente.

$$CE_{tra} = \sum EE_{com,i} \times CC_{tra,i} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$ECO_{2\ tra} = \sum FCO_{2\ com,i} \times CC_{tra,i} \quad \text{(Equação 5)}$$

em que:

CE_{tra}	consumo energético do serviço nas operações de transporte (MJ/UF);
EE_{com}	energia embutida do combustível (MJ/l);
CC_{tra}	consumo de combustível nas operações de transporte (l/UF);
$ECO_{2\ tra}$	emissão de CO ₂ do serviço nas operações de transporte (kgCO ₂ /UF);
$FCO_{2\ com}$	fator de emissão de CO ₂ do combustível (kgCO ₂ /l).

Tanto a energia embutida “ EE_{com} ” como o fator de emissão de CO₂ “ $FCO_{2\ com}$ ” dos combustíveis dos equipamentos devem ser obtidos conforme disposições do item 3.2.2.

3.2.4. Etapa de atividades executivas dos equipamentos

Além das etapas de produção dos materiais e operações de transporte, as atividades executivas dos equipamentos também contribuem para o consumo energético e para a emissão de CO₂. De forma análoga à apresentada para as operações de transporte, o consumo energético e a emissão de CO₂ dependem do consumo de combustível dos equipamentos em suas atividades executivas, o qual pode ser obtido pela Equação 6.

$$CC_{exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \quad (\text{Equação 6})$$

em que:

CC_{exe} consumo de combustível nas atividades executivas dos equipamentos (l/UF);

FC_{equ} coeficiente de consumo do equipamento (l/kWh);

P_{equ} potência do equipamento (kW);

Q_{equ} quantidade do equipamento no serviço;

P_{ser} produção de equipe do serviço (UF/h);

UO_{equ} utilização operativa do equipamento no serviço.

Os parâmetros afetos ao coeficiente de consumo “ FC_{equ} ” e à potência “ P_{equ} ” são obtidos do mesmo modo apresentado no item 3.2.3. Já a quantidade do equipamento “ Q_{equ} ” e a utilização operativa do equipamento “ UO_{equ} ” são indicadas na lista pós-decomposição da CCU do serviço, enquanto a produção de equipe “ P_{ser} ” é apropriada na composição de custos principal.

Multiplicando a energia embutida e o fator de emissão de CO₂ dos combustíveis pelo consumo de combustível, obtêm-se o consumo energético e a emissão de CO₂ das atividades executivas dos equipamentos do serviço, em conformidade com as Equações 7 e 8, respectivamente.

$$CE_{exe} = \sum EE_{com,i} \times CC_{exe,i} \quad (\text{Equação 7})$$

$$ECO_{2\ exe} = \sum FCO_{2\ com,i} \times CC_{exe,i} \quad (\text{Equação 8})$$

em que:

CE_{exe} consumo energético do serviço nas atividades executivas dos equipamentos (MJ/UF);

EE_{com} energia embutida do combustível (MJ/l);

CC_{exe} consumo de combustível nas atividades executivas dos equipamentos (l/UF);

$ECO_{2\ exe}$ emissão de CO₂ do serviço nas atividades executivas dos equipamentos (kgCO₂/UF);

$FCO_{2\ com}$ fator de emissão de CO₂ do combustível (kgCO₂/l).

Novamente, a energia embutida “ EE_{com} ” e o fator de emissão de CO₂ “ $FCO_{2\ com}$ ” relacionados aos combustíveis dos equipamentos devem ser obtidos conforme disposições do item 3.2.2.

É importante ressaltar que, no contexto do SICRO, a energia necessária ao funcionamento dos equipamentos elétricos é fornecida através de grupos geradores, os quais são apropriados na parcela “A – Equipamentos” das composições de custos. Portanto, caso o serviço possua equipamentos elétricos, eles são desconsiderados do cálculo relativo às atividades executivas, pois seus consumos energéticos e emissões de CO₂ são contabilizados por meio dos geradores.

3.2.5. Total do serviço

O consumo energético e a emissão de CO₂ total do serviço são obtidos pela soma das parcelas de produção dos materiais (item 3.2.2), operações de transporte (item 3.2.3) e atividades executivas dos equipamentos (item 3.2.4), conforme indicado nas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$CE_{tot} = CE_{pro} + CE_{tra} + CE_{exe} \quad (\text{Equação 9})$$

$$ECO_{2\ tot} = ECO_{2\ pro} + ECO_{2\ tra} + ECO_{2\ exe} \quad (\text{Equação 10})$$

em que:

CE_{tot} consumo energético total do serviço (MJ/UF);

$ECO_{2\ tot}$ emissão de CO₂ total do serviço (kgCO₂/UF).

3.3. QUALIFICAÇÃO DA ACV OBTIDA COM OS DADOS DO SICRO

Visando qualificar os valores de CE e ECO₂ calculados a partir dos dados do SICRO pelo método proposto neste trabalho, torna-se relevante a comparação desses resultados com aqueles obtidos pelo emprego de ferramentas estruturadas para esse propósito e já consolidadas na literatura para análise de ciclo de vida.

Nesse contexto, estabeleceu-se como etapa deste trabalho a análise do ciclo de vida de serviços de infraestrutura com o uso do *software* OpenLCA. Essa ferramenta requer parâmetros de entrada relacionados ao objeto de análise para obtenção dos resultados de saída da ACV.

O *software* em questão dispõe de processos médios para representar as contribuições dos equipamentos em operação, dispostos em função de faixas médias de potência do maquinário e de distâncias de deslocamento de transporte.

Assim, os itens relacionados na etapa de decomposição da CCU são utilizados como entrada no OpenLCA, sendo atribuídos a processos constantes da base de dados Ecoinvent no *software*. Similar ao critério estabelecido no item 3.2.2 para a energia embutida e fator de emissão dos materiais, priorizou-se a seleção de processos adaptados à realidade brasileira na base Ecoinvent, visando mitigar incertezas oriundas da atribuição de dados secundários estrangeiros.

Os processos relativos a cada item da lista pós-decomposição são então agrupados sob a forma de um macroprocesso, representando uma unidade de medida da CCU (*i.e.*, unidade funcional).

A partir desses dados de entrada, o OpenLCA gera os resultados de inventário e impacto ambiental da ACV. Neste trabalho, adotou-se o modelo de sistema *cut-off* na base de dados Ecoinvent, além de cinco categorias de impacto ambiental para análise, a saber (EcoQuery, [*s. d.*]):

- **Potencial de acidificação:** representa as emissões de poluentes acidificantes que resultam em efeitos negativos no solo, águas e ecossistemas em geral;
- **Potencial de eutrofização de água doce:** refere-se ao enriquecimento excessivo de corpos d'água com nutrientes como nitrogênio e fósforo, que estimulam o crescimento descontrolado de algas. Esse fenômeno reduz os níveis de oxigênio dissolvido na água,

causando sérios impactos ao ecossistema aquático e comprometendo sua biodiversidade e equilíbrio natural;

- **Potencial de ecotoxicidade de água doce:** avalia a incorporação de substâncias químicas e organismos que geram efeitos adversos em ambientes de água doce;
- **Potencial de aquecimento global:** indica o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera;
- **Potencial de toxicidade humana:** examina os riscos que substâncias tóxicas podem representar para a saúde humana.

3.4. ACCV COM O SICRO

Considerando que o objetivo principal deste estudo parte da premissa de que os serviços analisados são passíveis de serem descritos por meio de composições de custos do SICRO, é natural que a análise desenvolvida avance dos parâmetros de sustentabilidade compreendidos na ACV para a avaliação do custo do ciclo de vida do elemento executado.

Nesse sentido, a ACCV realizada neste trabalho se vale da metodologia do SICRO para estimativa de custos, preconizadas pelo Manual de Custos de Infraestrutura da Transporte (DNIT, 2017).

Os custos de execução dos serviços podem ser obtidos por meio dos relatórios de composições de custos do SICRO, divulgados trimestralmente no sítio eletrônico do DNIT. Não obstante, vale ressaltar que os custos das composições divulgados nos referidos relatórios não contemplam a aquisição e transporte dos materiais asfálticos (DNIT, 2017a), itens significativos na formação do preço de obras de pavimentação. Assim, a remuneração desses itens no âmbito do DNIT é preconizada por meio da Portaria nº 1.977 (DNIT, 2017b), de 25 de outubro de 2017, que estabelece o uso dos preços informados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o valor de aquisição dos materiais asfálticos, ao passo que os gastos provenientes do transporte desses insumos devem ser obtidos por meio das equações tarifárias dispostas na mesma portaria.

Além disso, os custos divulgados nos relatórios do SICRO não incluem dos dispêndios referentes ao momento de transporte dos insumos não asfálticos empregados nos serviços. Portanto, torna-se necessário acrescer esse valor ao custo total da CCU, considerando o tipo de

via do deslocamento (*i.e.*, leito natural, revestimento primário ou rodovia pavimentada) e a distância média de transporte associada.

Segundo DNIT (2017a), o preço de venda consiste no custo dos serviços acrescidos da parcela de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI). A Instrução Normativa nº 62, de 17 de setembro de 2021 (DNIT, 2021), por sua vez, regulamenta a aplicação das taxas referenciais de BDI no âmbito do DNIT, além de estabelecer a adoção obrigatória de BDI diferenciado para os preços de referência de aquisição e transporte dos materiais betuminosos.

Posto isso, sintetiza-se o processo adotado de orçamentação por meio do SICRO nas seguintes etapas:

- Obtenção dos custos dos serviços por meio dos relatórios de composições de custos do SICRO;
- Incorporação dos dispêndios referentes ao momento de transporte dos insumos não asfálticos nos custos das CCUs;
- Atribuição, na planilha orçamentária, dos custos de aquisição dos materiais asfálticos a partir dos valores referenciais divulgados pela ANP;
- Inclusão dos custos de transporte dos materiais asfálticos por meio das equações tarifárias do DNIT;
- Aplicação da parcela de BDI aos custos apropriados na planilha orçamentária, resultando nos preços dos itens;
- Somatório dos preços de cada item, obtendo o valor total do orçamento.

3.5. CUSTO DE EMISSÃO DE CARBONO

O cálculo do custo associado à emissão de carbono de um produto pode ser obtido a partir da quantidade de CO₂ gerado em seu ciclo de vida e do custo por tonelada de carbono precificado pela política de iniciativa em questão, conforme representado na Equação 11.

$$MCO_2 = ECO_{2\ tot} \times TECO_2 \quad (\text{Equação 11})$$

em que:

MCO_2 custo de emissão de CO₂ do serviço (R\$/UF);

$ECO_{2\ tot}$ emissão de CO₂ total do serviço (tCO₂/UF);

$TECO_2$ taxa de emissão de CO₂ (R\$/tCO₂).

Vale salientar que, no cálculo do custo de emissão de um empreendimento, a massa total de CO₂ considerada pode ser aquela que excede os limites estabelecidos a uma entidade, e não o valor total. Para isso, é necessário definir condições específicas do produto analisado, e ainda que esse esteja associado a um contexto que define esse tipo de limite de emissão.

No que tange à taxa de emissão de CO₂, é importante que seja observado o valor mais aderente à política de iniciativa na qual o caso prático se insere. Portanto, o método estabelecido neste trabalho não restringe ou conduz a atribuição de uma taxa específica à emissão de carbono, possibilitando que sua aplicação adote o valor mais compatível com as condições particulares em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com intuito de demonstrar o uso do método proposto, este capítulo apresenta e detalha sua aplicação para um exemplo de comparação entre duas estruturas de pavimento rodoviário, seguindo a mesma estruturação descrita no Capítulo 3.

4.1. DEFINIÇÃO DE ESCOPO DA ACV E ACCV

Primeiramente, é essencial definir as etapas do ciclo de vida consideradas nesta aplicação. Santero *et al.* (2011b) apontam na revisão sistemática de pesquisas de ACV na pavimentação que a etapa de demolição e descarte é frequentemente desconsiderada nas análises desse tipo de estrutura pois não é comum que os pavimentos sejam completamente descartados ao final de suas vidas úteis. Diante disso, as etapas consideradas nesta aplicação consistem na extração e processamento fabril das matérias-primas, transporte dos insumos, construção e manutenção dos pavimentos, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Etapas do ciclo de vida contempladas no exemplo de aplicação do método



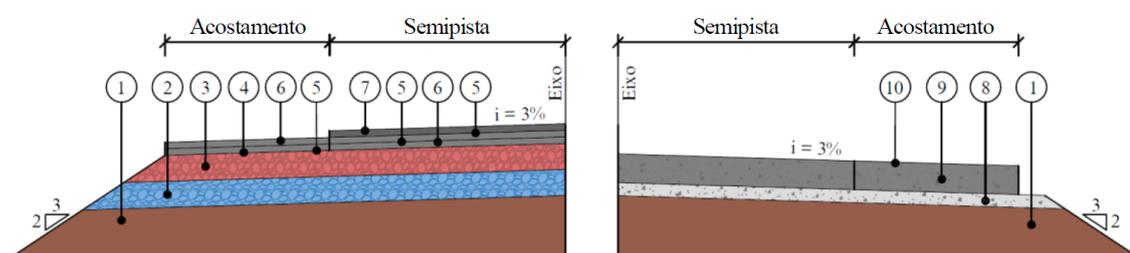
Fonte: De autoria própria.

Conforme discutido no item 3.1, essencialmente, a unidade funcional da ACV do método é definida pela unidade de medida da própria CCU do SICRO. Todavia, tal característica permite que as análises desenvolvidas diante de sua aplicação comparem não apenas serviços, mas diversas estruturas e elementos, desde que esses possam ser descritos como um conjunto de composições de custos. Desse modo, a comparação em questão é desenvolvida por quilômetro de pista simples para duas soluções de pavimento: uma em revestimento asfáltico e outra em concreto de cimento Portland.

Buscou-se estabelecer estruturas de pavimentos asfáltico e de concreto tecnicamente compatíveis, ou seja, que atendam a um mesmo volume de tráfego. Outro critério estabelecido foi de que as características de cada uma das estruturas retratem as principais práticas construtivas executadas em âmbito nacional, buscando representatividade da malha rodoviária brasileira na avaliação do estudo.

Nesse sentido, recorreu-se à metodologia dos Custos Médios Gerenciais (CMG) do DNIT, a qual promoveu a análise da base de projetos executados pela autarquia, definindo sete principais soluções-tipo de construção de pavimento. Dentre as soluções constantes do CMG, estabeleceu-se a solução-tipo F para representar a construção de pavimento asfáltico, ao passo que o pavimento de concreto de cimento Portland foi retratado pela solução-tipo G, ambas dimensionadas para um Número N de 10^8 (DNIT, 2019). Ao lado esquerdo da Figura 10, tem-se a semisseção transversal do pavimento asfáltico, enquanto o lado direito da mesma imagem define a semisseção do pavimento de concreto.

Figura 10 - Semisseção do pavimento asfáltico e de concreto de cimento Portland, respectivamente (sem escala)



1. Regularização do subleito
2. Sub-base de brita graduada - espessura: 20 cm
3. Base de brita graduada tratada com cimento - espessura: 20 cm
4. Tratamento superficial simples com emulsão
5. Pintura de ligação
6. Concreto asfáltico - faixa B - espessura 5 cm
7. Concreto asfáltico - faixa C - espessura 5 cm

Fonte: De autoria própria.

1. Regularização do subleito
8. Sub-base de concreto compactado com rolo - espessura: 10 cm
9. Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - espessura: 22 cm
10. Cura com pintura asfáltica

Em consulta à base de projetos do CMG, verificou-se que a classe I-B em relevo ondulado é a mais frequente. Dadas as diretrizes do Manual de Projetos Geométricos de Rodovias Rurais (DNER, 1999), essa classe de rodovia tem largura de 3,6 m por faixa de rolamento e de 2,5 m por acostamento.

Por fim, definidas as características dos pavimentos, avançou-se para a determinação das intervenções de restauração e conservação periódica, necessárias para a devida manutenção dessas estruturas ao longo de suas vidas de serviço.

Souza (2017) aplicou modelos de previsão de desempenho para definir intervenções de restauração e conservação em estruturas de pavimento similares às utilizadas nesta aplicação. Assim, tais informações foram adaptadas, visando o atendimento à vida de serviço de 20 anos dos pavimentos deste estudo, conforme soluções dispostas na Tabela 1. Salienta-se que os valores apresentados nas colunas que consolidam mais de um ano representam o percentual da área mantida a cada ano.

Tabela 1 - Intervenções de manutenção

Pavimento	Tipo de manutenção	Serviço	Percentual de pavimento mantido													
			2º ano	3º ano	4º ano	5º ano	6º ao 9º ano	10º ano	11º ao 13º ano	14º ano	15º ano	16º ano	17º ano	18º ano	19º ano	20º ano
Asfalto	Restauração	Microrrevestimento - pista	-	-	-	50%	-	50%	-	50%	-	-	50%	-	-	-
		Microrrevestimento - acostamento	-	-	-	10%	-	10%	-	10%	-	-	10%	-	-	-
		Fresagem descontínua de 2 cm - pista	-	-	-	50%	-	50%	-	50%	-	-	50%	-	-	-
		Fresagem descontínua de 2 cm - acostamento	-	-	-	10%	-	10%	-	10%	-	-	10%	-	-	-
		Concreto asfáltico com polímero - espessura de 3 cm - pista	-	-	-	50%	-	50%	-	50%	-	-	50%	-	-	-
		Concreto asfáltico com polímero - espessura de 3 cm - acostamento	-	-	-	10%	-	10%	-	10%	-	-	10%	-	-	-
		Pintura de ligação - pista	-	-	-	50%	-	50%	-	50%	-	-	50%	-	-	-
		Pintura de ligação - acostamento	-	-	-	10%	-	10%	-	10%	-	-	10%	-	-	-
	Conservação	Correção de defeitos por fresagem - espessura de 2 cm	0,50%	1,00%	1,50%	2,00%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%
		Correção de defeitos com mistura betuminosa - espessura de 2 cm	0,50%	1,00%	1,50%	2,00%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%	2,50%
		Reparo localizado - espessura de 5 cm	0,10%	0,20%	0,30%	0,40%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%
		Remendo profundo - espessura de 30 cm	0,02%	0,04%	0,06%	0,08%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
	Concreto	Restauração	Limpeza e enchimento de fissuras	-	-	-	-	-	20%	-	-	-	-	-	-	-
			Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	-	-	-	-	-	-	-	-	2%	-	-	-	-
Conservação		Limpeza, serragem e enchimento de trincas	0,5%	1%	1,5%	2%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	

Fonte: Adaptado de Souza (2017).

De posse desses dados, tornou-se possível relacionar composições de custos unitários do SICRO e seus respectivos quantitativos, por quilômetro de via, às etapas de construção e manutenção necessárias durante a vida de serviço dos pavimentos estudados, resultando na relação disposta na Tabela 2.

Tabela 2 - Serviços e quantitativos por quilômetro de via para os pavimentos asfáltico e de concreto

Pavimento	Intervenção	Código SICRO	Descrição	Un.	Quantidade (un./km)
Asfáltico	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	13.400,00
		4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m ³	2.620,00
		4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m ³	2.500,00
		4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m ²	12.200,00
		4011353	Pintura de ligação	m ²	31.600,00
		4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	864,00
		4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	2.928,00
		4011212	Varredura da superfície para execução de revestimento asfáltico	m ²	43.800,00
	Manutenção	4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m ²	16.400,00
		4915661	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico - espessura de 3 cm	m ³	328,00
		4011353	Pintura de ligação	m ²	16.400,00
		4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	1.180,80
		4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua do revestimento asfáltico	m ³	103,70
		4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	103,70
		4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m ³	62,22
4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m ³	51,85		
Concreto	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	13.300,00
		4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m ³	1.315,00
		4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m ²	12.200,00
		4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m ³	2.684,00
		4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	3.784,44
	Manutenção	4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	53,68
		4915714	Limpeza e enchimento com resina epóxi de fissuras niveladas com abertura máxima de 0,4 mm e profundidade de 20 mm em pavimento de concreto que não atravessam toda a espessura da placa	m	2.440,00
4915695	Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm em pavimento de concreto com CAP	m	5.185,00		

Fonte: De autoria própria.

4.2. ACV COM A PARTIR DE DADOS DO SICRO

Definidas as composições de custos e seus quantitativos em cada uma das soluções-tipo comparadas, avança-se para a etapa de obtenção dos valores de CE e ECO₂ dessas CCUs, conforme método apresentado no item 3.2. Dada a elevada quantidade de composições de custos elencadas, este exemplo se delimitou em expor os detalhes de aplicação da metodologia para uma única CCU (*i.e.*, “4011463 - Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais”), sabendo que as demais seguem o mesmo procedimento. Não obstante, as tabelas com os resultados analíticos de aplicação do método para as demais composições de custos são apresentadas sob a forma do Apêndice A. Ainda, os cálculos desenvolvidos nesta aplicação foram realizados por meio de planilhas editáveis no *software* Excel.

4.2.1. Decomposição da CCU

O processo de decomposição tem como objetivo explicitar os itens que estão vinculados a uma mesma CCU, evidenciando aqueles que ficam atribuídos dentro das composições de custos auxiliares e de tempo fixo. Assim, a lista pós-decomposição do serviço sob código SICRO “4011463” é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Lista pós-decomposição da CCU do serviço 4011463

(continua)

Tipo	Código SICRO	Descrição	Quantidade	Utilização operativa
Equipamentos	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,71
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	1,00000	0,82
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	1,00000	1,00
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	1,02000	1,00
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	1,02000	0,80
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	1,02000	1,00
	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	2,04000	1,00
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	1,02000	1,00
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - usinagem de concreto asfáltico - faixa C	3,06000	0,81
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - areia média	1,49062	0,86
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - brita 0	0,28666	0,86
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - brita 1	0,28666	0,86
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - pedrisco	0,63064	0,86
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW - cal hidratada	0,05732	1,00

					(conclusão)
Tipo	Código SICRO	Descrição	Unidade	Quantidade	
Materiais	M0028	Areia média	m ³	0,33125	
	M0005	Brita 0	m ³	0,06370	
	M0191	Brita 1	m ³	0,06370	
	M0344	Cal hidratada - a granel	kg	57,32400	
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,06449	
	M1941	Óleo tipo A1	l	8,16000	
	M1103	Pedrisco	m ³	0,14014	
Tipo	Código SICRO	Descrição	Unidade	Quantidade	Equipamento transportador
Momento de transporte	6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C	t	1,02000	E9579 - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW
	M0028	Areia média	t	0,49687	E9579 - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW
	M0005	Brita 0	t	0,09555	E9579 - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW
	M0191	Brita 1	t	0,09555	E9579 - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW
	M0344	Cal hidratada - a granel	t	0,05732	E9146 - Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW
	M1103	Pedrisco	t	0,21021	E9579 - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,06449	E9013 - Caminhão tanque de asfalto com capacidade de 31.000 l - 265 kW
	M1941	Óleo tipo A1	l	8,16000	E9013 - Caminhão tanque de asfalto com capacidade de 31.000 l - 265 kW

Fonte: De autoria própria.

4.2.2. Etapa de produção dos materiais

Para a etapa de produção dos materiais, deve-se obter as massas dos insumos por unidade da CCU. Após relacionar a quantidade dos materiais da atividade auxiliar à CCU principal, foi necessário multiplicar esses valores pela massa específica dos insumos informada no SICRO, resultando na massa do material no serviço.

Tratando dos dados secundários de energia embutida (EE) e fator de emissão de CO₂ (FCO₂) de cada material, os valores utilizados neste exemplo de aplicação são apresentados na Tabela 4, cuja obtenção ocorreu da seguinte maneira:

- Priorizou-se a adoção dos valores médios do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), o qual disponibiliza em seu sítio eletrônico dados

brasileiros atualizados para os principais materiais empregados na construção (SIDAC, 2024);

- Na ausência do insumo na base de dados do SIDAC, recorreu-se às Declarações ambientais de produto (EPDs) de fabricantes de materiais, que consistem em um programa global para declarações ambientais com base na ISO 14025:2015 e na EN 15804 (EDP Internacional AB, 2024);
- Não havendo o material nessas duas bases, realizou-se a coleta de EE e FCO₂ em referenciais bibliográficos nacionais.

Tabela 4 - Valores de referência para EE e FCO₂ adotados no exemplo de aplicação

Material	Un.	Energia embutida (EE)		Fator de emissão de CO ₂ (FCO ₂)	
		Valor (MJ/un)	Fonte	Valor (kgCO ₂ /un)	Fonte
Areia	t	96,70		6,26	
Brita	t	49,09		2,33	
Cimento	t	4.055,50		689,05	
Aço	t	12.037,50		743,45	
Cal hidratada	t	4.527,00	SIDAC (2024)	732,10	SIDAC (2024)
Fíler calcário	t	186,63		3,92	
Óleo tipo A1	l	40,15		3,11	
Diesel	l	35,21		2,29	
Gasolina	l	29,63		1,63	
Aditivo plastificante e retardador de pega	t	3.560,00	EDP Internacional AB (2024)	136,00	EDP Internacional AB (2024)
Materiais asfálticos	t	51.000,00	Tavares (2006)	307,00	Silva (2013)
Polietileno de alta densidade	t	95.000,00		1.100,00	Souza (2017)
Adesivo à base de resina epóxi	t	137.000,00	Silva (2013)	5.708,00	Silva (2013)

Fonte: De autoria própria.

Nota: A utilização de valores definidos em referências anteriores a 2017 tornou-se necessária para os materiais que não foram encontrados em fontes mais atualizadas.

A partir dessas informações, foi possível calcular “CE_{pro}” e “ECO_{2pro}” para cada material e para o serviço, conforme disposto na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de CE_{pro} e ECO_{2pro} do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”

Código insumo	Descrição insumo	Massa do material no serviço (t/UF)	EE_{pro} (MJ/t)	FCO_{2pro} (kgCO ₂ /t)	CE_{pro} (MJ/UF)	ECO_{2pro} (kgCO ₂ /UF)
M0028	Areia média	0,49687	96,70	6,26	48,05	3,11
M0005	Brita 0	0,09555	49,09	2,33	4,69	0,22
M0191	Brita 1	0,09555	49,09	2,33	4,69	0,22
M0344	Cal hidratada - a granel	0,05732	4.527,00	732,10	259,51	41,97
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,06449	51.000,00	307,00	3.289,22	19,80
M1941	Óleo tipo A1	0,00816	40,15	3,11	0,33	0,03
M1103	Pedrisco	0,21021	49,09	2,33	10,32	0,49
Total					3.616,81	65,84

Fonte: De autoria própria.

4.2.3. Etapa de operações de transporte

Para a segunda parcela, deve-se observar quais atividades auxiliares e materiais são transportados na realização do serviço e como ocorre o deslocamento de cada um deles.

Os dados referentes ao coeficiente de consumo “ FC_{equ} ”, à potência “ P_{equ} ” e à capacidade “ Cap_{equi} ” foram obtidos no Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos (DNIT, 2024a). Para as velocidades médias “ v_{equ} ” dos equipamentos no transporte, foram adotados os valores referenciais da metodologia do SICRO para leito natural (40 km/h) e rodovia pavimentada (60 km/h) (DNIT, 2017a). Por fim, as distâncias médias “ DMT_{equ} ” foram atribuídas em conformidade com as premissas estabelecidas na metodologia do CMG, conforme a Tabela 6 resume.

Tabela 6 - Distância médias e velocidades adotadas no estudo

Tipo de intervenção	Item	Velocidade (km/h)	Distância (km)
Todas	Emulsões asfálticas	60	229,58
	Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	60	299,47
	Demais materiais	60	50,00
Construção	Atividades auxiliares	40	9,00
Restauração	Atividade auxiliar e materiais demolidos	60	27,00
Conservação	Atividade auxiliar e materiais demolidos	60	25,00

Fonte: Adaptado de DNIT (2019).

De posse desses dados e das Equações 4 e 5, calcula-se o consumo de combustível apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Consumo de combustível no transporte do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”

Código SICRO	Descrição do insumo	m_{tra} (t/UF)	DMT_{equ} (km)	V_{equ} (km/h)	ET	FC_{equ} (l/kWh)	P_{equ} (kW)	Cap_{equ} (t)	CC_{tra} (l/UF)
6416078	Usinagem de concreto asfáltico faixa C	1,02000	9,00	40	E9579	0,14	188	15	0,80539
M0028	Areia média	0,49687	50,00	60	E9579	0,14	188	15	1,45306
M0005	Brita 0	0,09555	50,00	60	E9579	0,14	188	15	0,27943
M0191	Brita 1	0,09555	50,00	60	E9579	0,14	188	15	0,27943
M0344	Cal hidratada - a granel	0,05732	50,00	60	E9146	0,19	265	31,29	0,15374
M1943	CAP 50/70	0,06449	299,47	60	E9013	0,19	265	31	1,04568
M1941	Óleo tipo A1	0,00816	50,00	60	E9013	0,19	265	31	0,02209
M1103	Pedrisco	0,21021	50,00	60	E9579	0,14	188	15	0,61474

ET representa o código SICRO do equipamento transportador.

Fonte: De autoria própria.

Sabendo que todos os equipamentos transportadores deste exemplo são movidos à diesel, utilizaram-se os valores de EE e FCO_2 apresentados para esse combustível na Tabela 4, resultando no consumo energético e emissão de CO_2 expostos na Tabela 8 para o transporte de cada material. Vale salientar que os materiais asfálticos não têm serviço de transporte associado na parcela F no padrão das CCUs do SICRO. Isso acontece porque os custos de transporte desses materiais são remunerados por meio de equação tarifária no âmbito do DNIT. Assim, ao utilizar esta metodologia, é importante avaliar cada um dos insumos para julgar de forma particular a necessidade do transporte para eles. Entendendo que essa parcela deve ser considerada, esta aplicação incorporou o transporte dos materiais asfálticos por meio do equipamento “E9013 - Caminhão tanque de asfalto com capacidade de 31.000 l - 265 kW”.

Tabela 8 - Valores de CE_{tra} e ECO_{2tra} do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”

Código SICRO	Descrição insumo	CC_{tra} (l/UF)	EE_{com} (MJ/l)	FCO_{2com} (kgCO ₂ /l)	CE_{tra} (MJ/UF)	ECO_{2tra} (kgCO ₂ /UF)
6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C	0,80539	35,21	2,29	28,36	1,84
M0028	Areia média	1,45306	35,21	2,29	51,16	3,33
M0005	Brita 0	0,27943	35,21	2,29	9,84	0,64
M0191	Brita 1	0,27943	35,21	2,29	9,84	0,64
M0344	Cal hidratada - a granel	0,15374	35,21	2,29	5,41	0,35
M1943	CAP 50/70	1,04568	35,21	2,29	36,82	2,39
M1941	Óleo tipo A1	0,02209	35,21	2,29	0,78	0,05
M1103	Pedrisco	0,61474	35,21	2,29	21,64	1,41
Total					163,85	10,66

Fonte: De autoria própria.

4.2.4. Etapa de atividade executivas dos equipamentos

A terceira e última parcela considerada na metodologia contabiliza o CE e a ECO_2 nas atividades executivas dos equipamentos. Partindo da lista pós-decomposição da Tabela 3, bem como de dados do SICRO para apropriação dos parâmetros “ P_{ser} ”, “ FC_{equ} ” e “ P_{equ} ”, a Tabela 9 exhibe o cálculo do consumo de combustível por equipamento.

Tabela 9 - Consumo de combustível nas atividades executivas do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”

Código SICRO	Descrição do insumo	Q_{equ}	UO_{equ}	P_{ser} (UF/h)	FC_{equ} (l/kWh)	P_{equ} (kW)	CC_{exe} (l/UF)
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,71	99,60	0,13	85	0,07877
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	1,00000	0,82	99,60	0,27	82	0,18228
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	1,00000	1,00	99,60	0,19	82	0,15643
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	1,02000	1,00	99,60	0,15	12	0,01843
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	1,02000	0,80	99,60	0,08	113	0,07406
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	1,02000	1,00	99,60	0,19	365	0,71021
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - usinagem de concreto asfáltico - faixa C	3,06000	0,81	99,60	0,14	188	0,65499
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - areia média	1,49062	0,86	457,16	0,14	188	0,07380
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - brita 0	0,28666	0,86	457,16	0,14	188	0,01419
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - brita 1	0,28666	0,86	457,16	0,14	188	0,01419
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - pedrisco	0,63064	0,86	457,16	0,14	188	0,03122
E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW - cal hidratada	0,05732	1,00	26,15	0,19	265	0,11037

Fonte: De autoria própria.

A partir dos valores de EE e FCO_2 apresentados na Tabela 4 para o combustível empregado, tem-se o CE e a ECO_2 demonstrados na Tabela 10 para as atividades executivas de cada equipamento no serviço.

Tabela 10 - Valores de CE_{exe} e ECO_{2exe} do serviço “Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - Código SICRO: 4011463”

Código SICRO	Descrição insumo	CC_{exe} (I/UF)	EE_{com} (MJ/l)	$FCO_{2\ com}$ (kgCO ₂ /l)	CE_{exe} (MJ/UF)	ECO_{2exe} (kgCO ₂ /UF)
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	0,07877	35,21	2,29	2,77	0,18
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	0,18228	35,21	2,29	6,42	0,42
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	0,15643	35,21	2,29	5,51	0,36
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	0,01843	35,21	2,29	0,65	0,04
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	0,07406	35,21	2,29	2,61	0,17
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	0,71021	35,21	2,29	25,01	1,63
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	0,65499	35,21	2,29	23,06	1,50
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	0,07380	35,21	2,29	2,60	0,17
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	0,01419	35,21	2,29	0,50	0,03
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	0,01419	35,21	2,29	0,50	0,03
E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	0,11037	35,21	2,29	3,89	0,25
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	0,03122	35,21	2,29	1,10	0,07
Total					74,61	4,85

Fonte: De autoria própria.

Salienta-se que, conforme orientado ao final do item 3.2.4, a contribuição dos equipamentos elétricos foi calculada a partir dos grupos geradores.

4.2.5. Total do serviço

Seguindo a lógica das parcelas demonstradas nos itens anteriores, calcularam-se os valores totais de CE e ECO₂ para cada um dos serviços necessários às soluções de pavimentos estudadas, cujos resultados se encontram na Tabela 11.

Por fim, relacionando os valores obtidos por UF com os quantitativos de cada CCU nas duas soluções-tipo de pavimento comparadas neste estudo, tem-se, na Tabela 12, o consumo energético e a emissão de CO₂ por quilômetro para a solução-tipo de pavimento asfáltico e de concreto de cimento Portland.

Tabela 11 - Valores de CE_{tot} e ECO_{2tot} por serviço

(continua)

Código SICRO	Descrição	UF	CE_{pro} (GJ/UF)	CE_{tra} (GJ/UF)	CE_{exe} (GJ/UF)	CE_{tot} (GJ/UF)	ECO_{2pro} (tCO₂/UF)	ECO_{2tra} (tCO₂/UF)	ECO_{2exe} (tCO₂/UF)	ECO_{2tot} (tCO₂/UF)
4011209	Regularização do subleito	m ²	-	-	0,00500	0,00500	-	-	0,00033	0,00033
4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m ³	0,10800	0,28769	0,06116	0,45686	0,00514	0,01871	0,00398	0,02783
4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m ³	0,46056	0,28695	0,06648	0,81399	0,06557	0,01866	0,00432	0,08855
4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m ²	0,07648	0,00168	0,00141	0,07957	0,00048	0,00011	0,00009	0,00068
4011353	Pintura de ligação	m ²	0,02295	0,00020	0,00064	0,02379	0,00014	0,00001	0,00004	0,00019
4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	3,61681	0,16385	0,07461	3,85527	0,06584	0,01066	0,00485	0,08135
4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	3,24650	0,16072	0,07440	3,48162	0,06007	0,01045	0,00484	0,07536
4011212	Varredura da superfície para execução de revestimento asfáltico	m ²	-	-	0,00020	0,00020	-	-	0,00001	0,00001
4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m ²	0,12153	0,00463	0,00464	0,13080	0,00078	0,00030	0,00030	0,00138
4915661	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico - espessura de 3 cm	m ³	-	0,13345	0,13544	0,26889	-	0,00868	0,00880	0,01748
4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	3,45707	0,18998	0,07552	3,72256	0,07548	0,01236	0,00491	0,09275
4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua do revestimento asfáltico	m ³	-	0,10641	0,14087	0,24728	-	0,00692	0,00914	0,01606
4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	10,60210	0,43865	0,20999	11,25073	0,13194	0,02853	0,01324	0,17371
4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m ³	2,43342	0,26076	0,21098	2,90516	0,06118	0,01696	0,01337	0,09151
4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m ³	10,29610	0,54244	0,55524	11,39377	0,13010	0,03528	0,03494	0,20032
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m ³	0,51846	0,31300	0,07510	0,90656	0,07427	0,02036	0,00488	0,09952
4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m ²	0,05865	0,00050	0,00059	0,05974	0,00035	0,00003	0,00004	0,00042
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m ³	1,64879	0,29426	0,09188	2,03493	0,25468	0,01914	0,00598	0,27979

(conclusão)

Código SICRO	Descrição	UF	CE _{pro} (GJ/UF)	CE _{tra} (GJ/UF)	CE _{exe} (GJ/UF)	CE _{tot} (GJ/UF)	ECO _{2pro} (tCO ₂ /UF)	ECO _{2tra} (tCO ₂ /UF)	ECO _{2exe} (tCO ₂ /UF)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /UF)
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	0,00418	0,00001	0,02482	0,02901	0,00003	-	0,00159	0,00162
4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	2,91158	0,24300	0,20927	3,36385	0,30600	0,01580	0,01304	0,33484
4915714	Limpeza e enchimento com resina epóxi de fissuras niveladas com abertura máxima de 0,4 mm e profundidade de 20 mm em pavimento de concreto que não atravessam toda a espessura da placa	m	0,00151	-	-	0,00151	0,00006	-	-	0,00006
4915695	Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm em pavimento de concreto com CAP	m	0,01275	0,00014	0,00426	0,01715	0,00008	0,00001	0,00023	0,00032

Fonte: De autoria própria.

Tabela 12 - Valores de CE_{tot} e ECO_{2tot} por quilômetro de solução-tipo

(continua)

Pavimento	Intervenção	Código SICRO	Descrição	UF	CE _{tot} (GJ/UF)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /UF)	Quantidade (UF/km)	CE _{tot} (GJ/km)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km)
Asfáltico	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	0,00500	0,00033	13.400,00	67,01	4,36
		4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m ³	0,45686	0,02783	2.620,00	1.196,97	72,90
		4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m ³	0,81399	0,08855	2.500,00	2.034,96	221,38
		4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m ²	0,07957	0,00068	12.200,00	970,75	8,32
		4011353	Pintura de ligação	m ²	0,02379	0,00019	31.600,00	751,65	6,08
		4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	3,85527	0,08135	864,00	3.330,95	70,28
		4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	3,48162	0,07536	2.928,00	10.194,19	220,65
	4011212	Varredura da superfície para execução de revestimento asfáltico	m ²	0,00020	0,00001	43.800,00	8,80	0,57	
	Manutenção	4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m ²	0,13080	0,00138	16.400,00	2.145,13	22,66
		4915661	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico - espessura de 3 cm	m ³	0,26889	0,01748	328,00	88,20	5,73
4011353		Pintura de ligação	m ²	0,02379	0,00019	16.400,00	390,10	3,16	

									(conclusão)
Pavimento	Intervenção	Código SICRO	Descrição	UF	CE _{tot} (GJ/UF)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /UF)	Quantidade (UF/km)	CE _{tot} (GJ/km)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km)
Asfáltico	Manutenção	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	3,72256	0,09275	1.180,80	4.395,60	109,52
		4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua do revestimento asfáltico	m ³	0,24728	0,01606	103,70	25,64	1,67
		4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	11,25073	0,17371	103,70	1.166,70	18,01
		4915631	Remendo profundo com imprimção com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m ³	2,90516	0,09151	62,22	180,76	5,69
		4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m ³	11,39377	0,20032	51,85	590,77	10,39
Concreto	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	0,00500	0,00033	13.300,00	66,51	4,33
		4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m ³	0,90656	0,09952	1.315,00	1.192,12	130,86
		4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m ²	0,05974	0,00042	12.200,00	728,88	5,18
		4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m ³	2,03493	0,27979	2.684,00	5.461,74	750,97
	4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	0,02901	0,00162	3.784,44	109,78	6,11	
	Manutenção	4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	3,36385	0,33484	53,68	180,57	17,97
		4915714	Limpeza e enchimento com resina epóxi de fissuras niveladas com abertura máxima de 0,4 mm e profundidade de 20 mm em pavimento de concreto que não atravessam toda a espessura da placa	m	0,00151	0,00006	2.440,00	3,68	0,15
4915695		Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm em pavimento de concreto com CAP	m	0,01715	0,00032	5.185,00	88,94	1,66	

Fonte: De autoria própria.

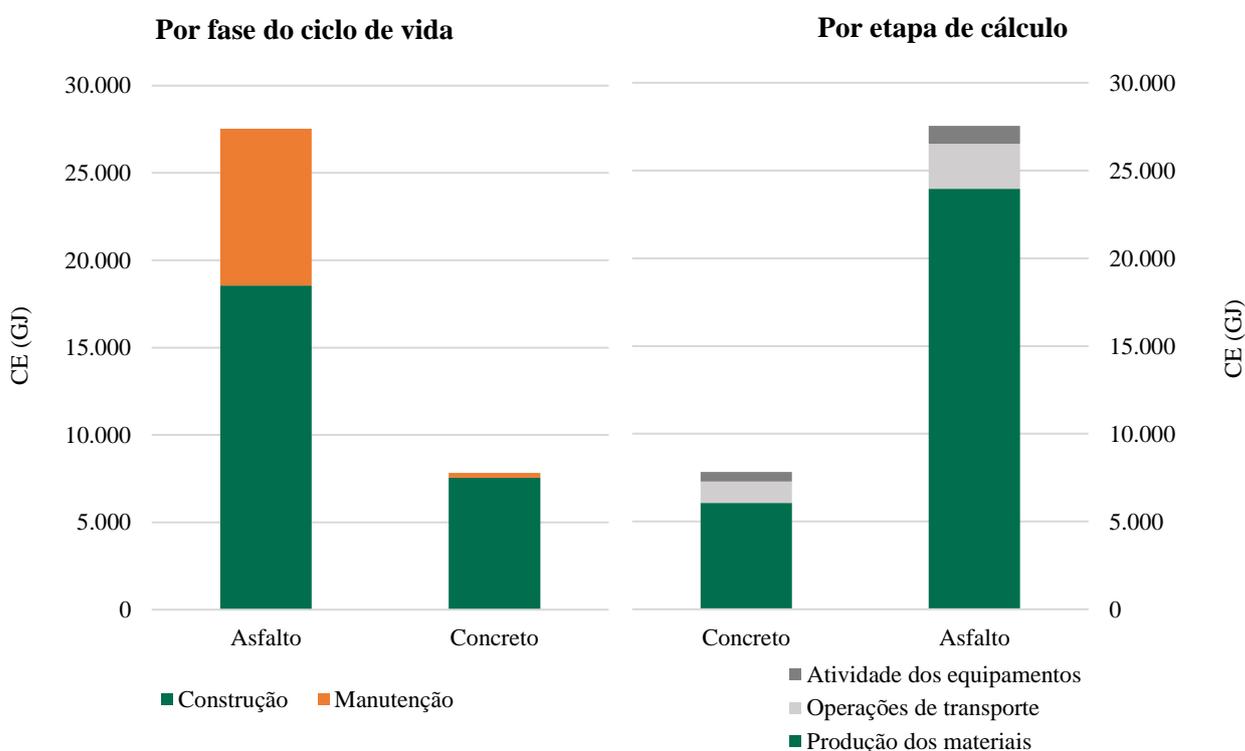
Somando os valores de CE_{tot} e ECO_{2tot} obtidos por serviço por quilômetro de solução-tipo, têm-se as contribuições por fase e etapa do ciclo de vida para cada pavimento, conforme demonstrado na Tabela 13. Esses valores são demonstrados de maneira visual nos gráficos da Figura 11 (consumo energético) e da Figura 12 (emissão de CO_2).

Tabela 13 - Valores de consumo energético e emissão de CO_2 por etapa e fase para cada pavimento

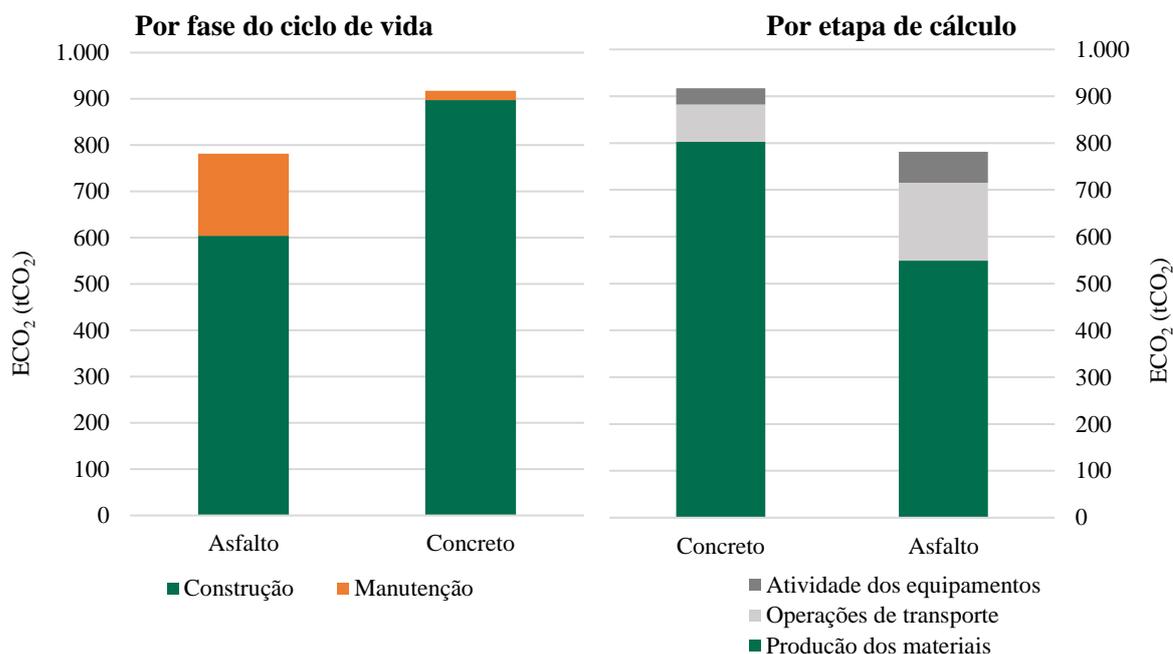
Pavimento	Fase	CE_{pro} (GJ/km)	CE_{exe} (GJ/km)	CE_{tra} (GJ/km)	CE_{tot} (GJ/km)	ECO_{2pro} (t CO_2 /km)	ECO_{2exe} (t CO_2 /km)	ECO_{2tra} (t CO_2 /km)	ECO_{2tot} (t CO_2 /km)
Asfáltico	Construção	15.723,31	721,92	2.110,04	18.555,27	420,36	46,95	137,23	604,54
	Manutenção	8.236,23	298,55	448,11	8.982,89	128,39	19,29	29,14	176,82
	Total	23.959,54	1.020,47	2.558,15	27.538,16	548,75	66,24	166,38	781,37
Concreto	Construção	5.838,48	512,99	1.207,56	7.559,03	785,64	33,27	78,54	897,44
	Manutenção	226,08	33,32	13,78	273,18	16,98	1,92	0,90	19,79
	Total	6.064,56	546,31	1.221,35	7.832,22	802,61	35,19	79,43	917,24

Fonte: De autoria própria.

Figura 11 - Consumo energético por fase do ciclo de vida e por etapa de cálculo, respectivamente



Fonte: De autoria própria.

Figura 12 - Emissão de CO₂ por fase do ciclo de vida e por etapa de cálculo, respectivamente

Fonte: De autoria própria.

Observa-se que o pavimento asfáltico consome 252% mais energia que a solução de concreto, ao passo que a emissão de CO₂ desse primeiro é 15% inferior ao pavimento de concreto. Tais resultados convergem com as análises de Zhou *et al.* (2022), Machado (2020) e Souza (2017), os quais concluíram que a quantidade de energia consumida nos pavimentos asfálticos estudados é superior à dos pavimentos de concreto, enquanto a emissão da estrutura de asfalto é inferior à obtida para a solução de concreto.

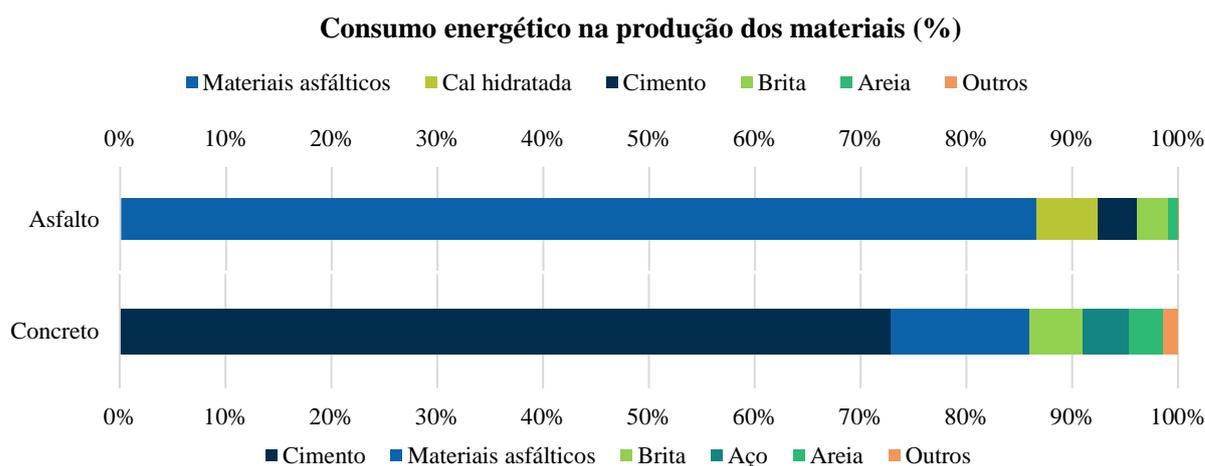
A emissão de CO₂ calculada por Souza (2017) foi de 446 tCO₂/km para o pavimento asfáltico e 812 tCO₂/km para o de concreto, ao passo que o consumo energético obtido pela autora foi respectivamente de 43.000 GJ/km e 16.700 GJ/km para essas soluções. Já as estruturas analisadas por Zhou *et al.* (2022) resultaram em emissões de carbono de 525 tCO₂/km para o pavimento asfáltico e 610 tCO₂/km para o pavimento de concreto, valores que se aproximam dos resultados desta pesquisa. No entanto, os valores encontrados pelos autores para o consumo energético diferem significativamente dos obtidos neste estudo, sendo de 540.000 GJ/km e 93.000 GJ/km para os pavimentos asfáltico e de concreto, respectivamente. As principais razões para essas disparidades são o uso de camadas com diferentes espessuras e materiais nos pavimentos, a inclusão das fases de uso e descarte no ciclo de vida, além do fato de o estudo de Zhou *et al.* (2022) considerar fatores de energia embutida e emissão de CO₂ específicos do contexto chinês.

Tratando da fase do ciclo de vida (parte esquerda das Figuras 11 e 12), é evidente que a construção se configura como a mais representativa para ambos os parâmetros e pavimentos analisados. A etapa de manutenção do pavimento de concreto representa apenas 3,5% do consumo energético e 2% das emissões de CO₂, ao passo que, no asfáltico, a manutenção é responsável por 33% do consumo energético e 23% das emissões de dióxido de carbono.

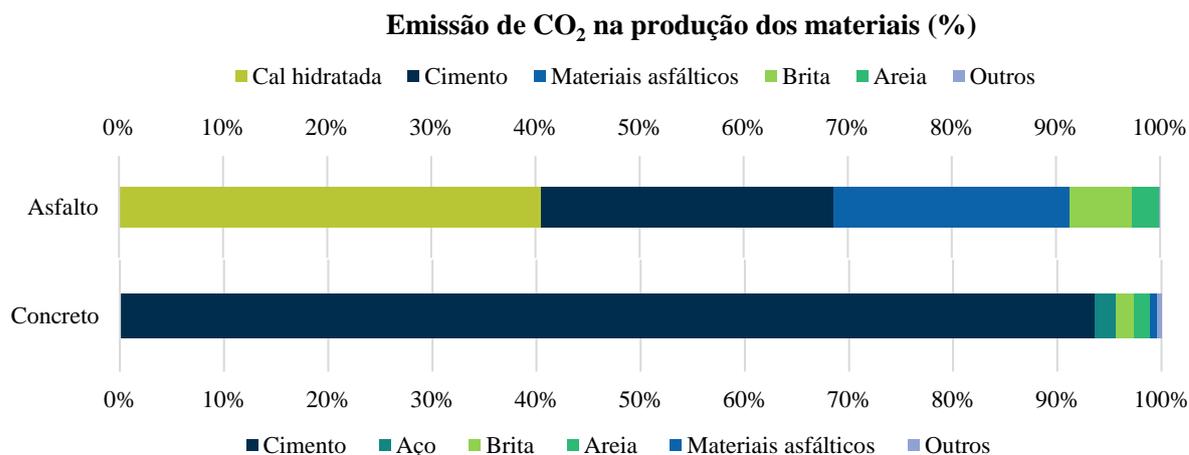
No que tange às etapas de cálculo (parte direita das Figuras 11 e 12), para ambas as estruturas, a produção dos materiais se demonstra como a mais significativa na ACV, refletindo mais de 87% e 77% da energia consumida para os pavimentos asfáltico e de concreto, respectivamente. A presente etapa também foi responsável por 70% das emissões de CO₂ no pavimento asfáltico, assim como por 88% das emissões no pavimento de concreto. Esses resultados vão ao encontro das pesquisas de Zhou *et al.* (2022), Machado (2020), que também indicaram a produção dos materiais como a maior responsável pelo consumo de energia e emissão de gases na construção de pavimentos.

Aprofundando a análise sobre a etapa que mais impacta o consumo energético e as emissões de CO₂, isto é, a produção dos materiais, são apresentados os gráficos da Figura 13 (consumo energético) e da Figura 14 (emissão de CO₂), os quais evidenciam a representatividade percentual de cada material no valor total de CE_{pro} e ECO_{2pro} calculados.

Figura 13 - Consumo energético por insumo na etapa de produção dos materiais



Fonte: De autoria própria.

Figura 14 - Emissão de CO₂ por insumo na etapa de produção dos materiais

Fonte: De autoria própria.

No caso do consumo energético, o cimento é o material de contribuição mais expressiva no pavimento de concreto, ao passo que os materiais asfálticos são os mais representativos no pavimento asfáltico.

Já para a emissão de CO₂, novamente o cimento é o material de maior relevância para a solução de concreto, contribuindo para mais de 94% da emissão total. Apesar do consumo de cal por quilômetro de pavimento asfáltico ser 24% inferior ao dos materiais asfálticos, a maior representatividade da cal nessa solução decorre do seu elevado fator de emissão, quase 2,4 vezes o valor atribuído aos materiais asfálticos.

Por fim, a categoria intitulada como “outros” compila as contribuições dos seguintes materiais menos representativos:

- Adesivo à base de resina epóxi;
- Polietileno de alta densidade;
- Óleo tipo A1;
- Aditivo plastificante; e
- Filer calcário.

As análises desenvolvidas evidenciam o papel de algumas escolhas de projeto no desempenho ambiental das estruturas de pavimento. Como exemplo, pode-se discorrer sobre a escolha do material de enchimento utilizado nas misturas asfálticas. As normas do DNIT para concreto asfáltico (DNIT, 2006) e microrrevestimento (DNIT, 2018) permitem tanto o emprego da cal hidratada quanto do filer calcário. Todavia, a energia embutida e o fator de emissão de CO₂ da cal hidratada (vide Tabela 4) são, respectivamente, 24 e 187 vezes o valor atribuído ao filer calcário. Assim, em um cenário em que a cal hidratada é substituída pelo filer calcário como material de enchimento, o pavimento asfáltico teria uma diminuição de 28% da massa de CO₂ emitida.

4.3. QUALIFICAÇÃO DA ACV OBTIDA COM OS DADOS DO SICRO

A qualificação dos resultados obtidos a partir dos dados do SICRO, pelo método discorrido na seção 3.2, foi realizada no *software* OpenLCA utilizando a base de dados Ecoinvent e o modelo de sistema *cut-off*.

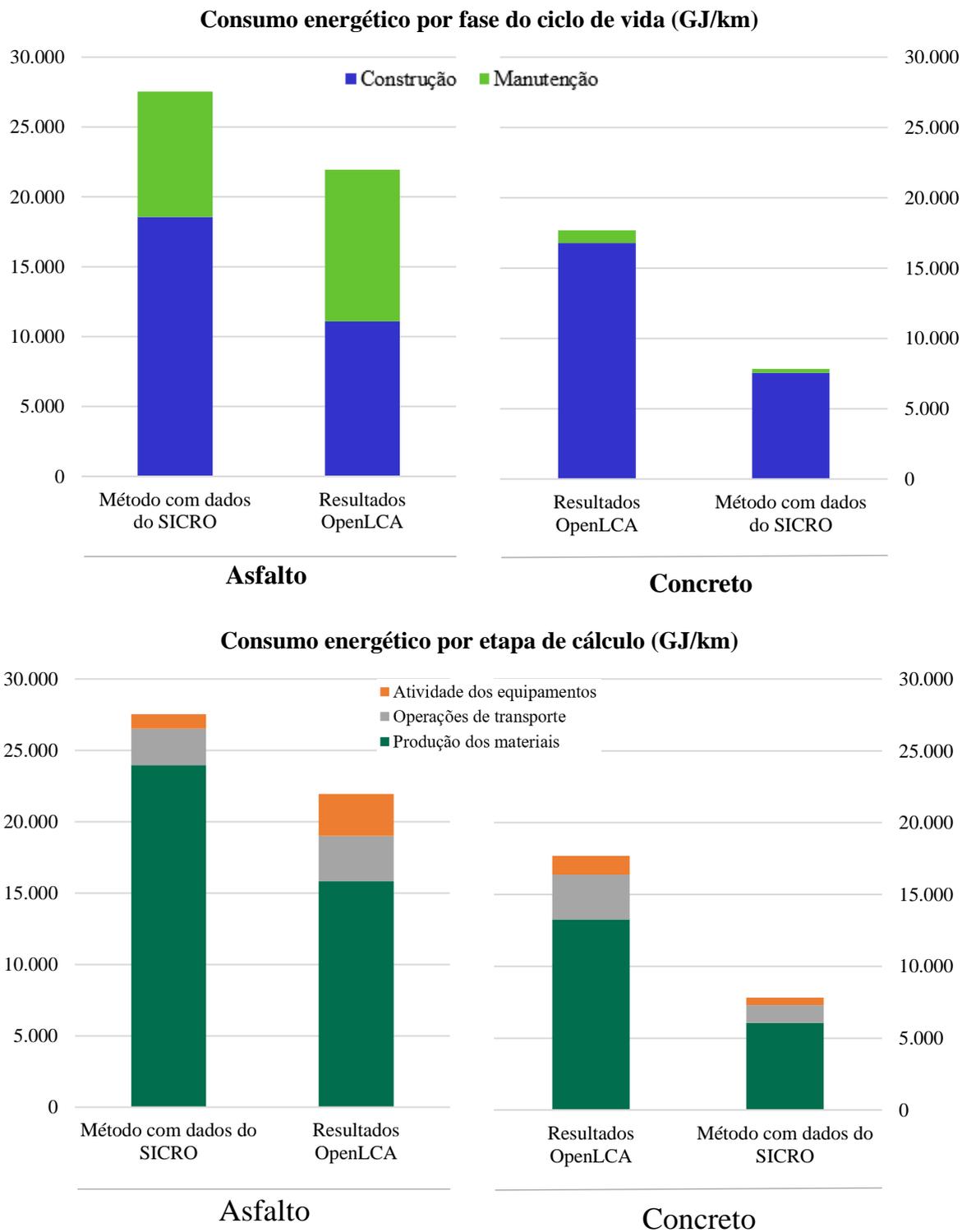
Os resultados gerados no OpenLCA são apresentados na Tabela 14. Com intuito de avaliar esses dados com aqueles obtidos a partir dos dados do SICRO, ambos foram plotados de maneira visual nos gráficos da Figura 15 (consumo energético) e da Figura 16 (emissão de CO₂).

Tabela 14 - Valores de consumo energético e emissão de CO₂ por etapa e fase para cada pavimento

Pavimento	Fase	CE _{pro} (GJ/km)	CE _{exe} (GJ/km)	CE _{tra} (GJ/km)	CE _{tot} (GJ/km)	ECO _{2pro} (tCO ₂ /km)	ECO _{2exe} (tCO ₂ /km)	ECO _{2tra} (tCO ₂ /km)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km)
Asfáltico	Construção	6.752,35	1.623,87	2.719,79	11.096,01	429,33	53,33	95,60	578,26
	Manutenção	9.068,43	1.322,54	457,62	10.848,58	213,26	86,92	32,20	332,38
	Total	15.820,79	2.946,41	3.177,40	21.944,60	642,59	140,25	127,80	910,64
Concreto	Construção	13.103,23	1.149,47	2.536,07	16.788,77	1.154,77	37,71	89,10	1.281,58
	Manutenção	157,34	163,87	571,99	893,20	20,31	10,77	40,27	71,35
	Total	13.260,58	1.313,34	3.108,06	17.681,98	1.175,09	48,49	129,36	1.352,94

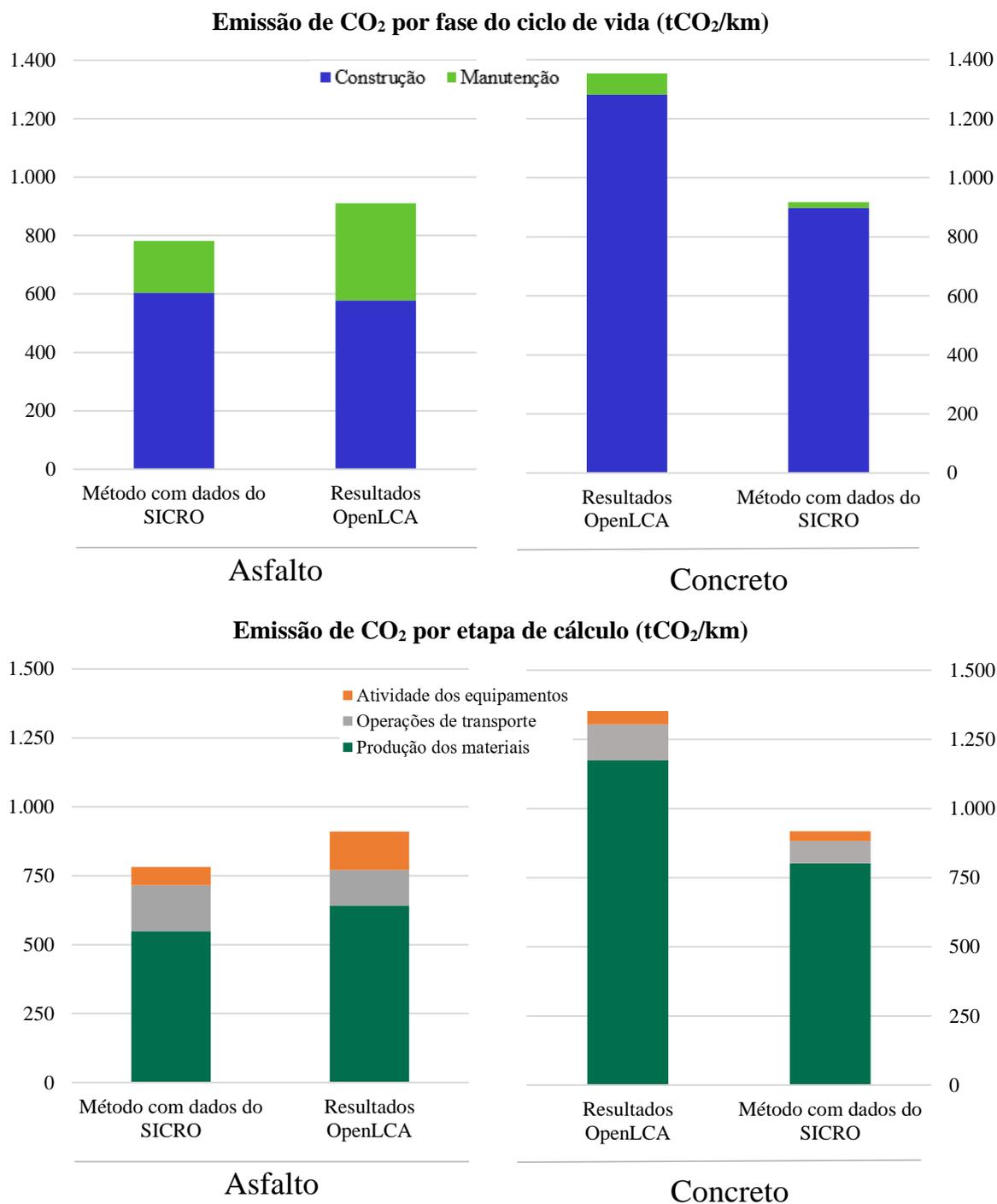
Fonte: De autoria própria.

Figura 15 - Comparação entre os resultados obtidos pelo método com dados do SICRO e pelo *software* OpenLCA (consumo energético)



Fonte: De autoria própria.

Figura 16 - Comparação entre os resultados obtidos pelo método com dados do SICRO e pelo *software* OpenLCA (emissão de CO₂)



Fonte: De autoria própria.

Sob a ótica do consumo energético, os resultados do OpenLCA também apontam o melhor desempenho do pavimento de concreto. Não obstante, a diferença de consumo energético entre os pavimentos é menor nos resultados do OpenLCA. O valor de CE_{tot} para o pavimento de asfalto é 20% maior pelo método do SICRO, ao passo que, para o pavimento de concreto, o consumo energético obtido pelo OpenLCA é 126% maior que o obtido pelo SICRO.

Tratando da emissão de CO₂, os resultados do OpenLCA também indicam maiores emissões para o pavimento de concreto. A diferença dos resultados pelo OpenLCA e pelo SICRO foram de 17% para a solução asfáltica e 48% para a de concreto.

No que tange às fases do ciclo de vida, nota-se que a proporção de representatividade da manutenção é similar nos resultados obtidos pelo OpenLCA e pelo SICRO, indicando uma maior contribuição da fase de construção em detrimento da manutenção. O mesmo acontece para as etapas de cálculo, uma vez que os resultados do OpenLCA também demonstram a produção dos materiais como a mais parcela representativa.

Aprofundando na etapa de produção dos materiais, a representatividade de cada insumo é disposta na Tabela 15, possibilitando a comparação entre esse percentual nos resultados obtidos pelo SICRO e pelo OpenLCA.

Tabela 15 - Comparação da representatividade por materiais para o método com dados do SICRO e pelo OpenLCA

Material	Consumo energético (GJ/km)				Emissão de CO ₂ (tCO ₂ /km)			
	Asfalto		Concreto		Asfalto		Concreto	
	Método com dados do SICRO	Resultados OpenLCA	Método com dados do SICRO	Resultados OpenLCA	Método com dados do SICRO	Resultados OpenLCA	Método com dados do SICRO	Resultados OpenLCA
Cimento	4%	15%	73%	66%	28%	33%	94%	89%
Brita	3%	18%	5%	11%	6%	15%	2%	4%
Materiais asfálticos	87%	60%	13%	6%	23%	15%	1%	1%
Aço	0%	0%	4%	9%	0%	0%	2%	4%
Areia	1%	1%	3%	6%	3%	2%	2%	2%
Cal hidratada	6%	4%	0%	0%	41%	34%	0%	0%
Outros	0%	3%	1%	2%	0%	2%	0%	1%

Fonte: De autoria própria.

Pela Tabela 15 é possível constatar que o material responsável pela maior parcela de contribuição foi o mesmo em ambos os métodos de obtenção, tanto para o consumo energético quanto para a emissão de CO₂. Todavia, nota-se uma maior representatividade da brita nos resultados do OpenLCA. Tal fato demonstra que o fator de emissão associado ao processo da brita no *software* é consideravelmente maior que aquele obtido por meio da plataforma SIDAC no método com dados do SICRO. Além disso, nota-se que o item da brita no OpenLCA consiste em uma entidade de representa tanto o cascalho quanto a pedra britada, que são agregados graúdos com processos produtivos diferentes.

Divergências nas quantificações dos dois métodos são esperadas, principalmente devido ao fato de o OpenLCA utilizar valores distintos dos empregados nesta aplicação para os fatores

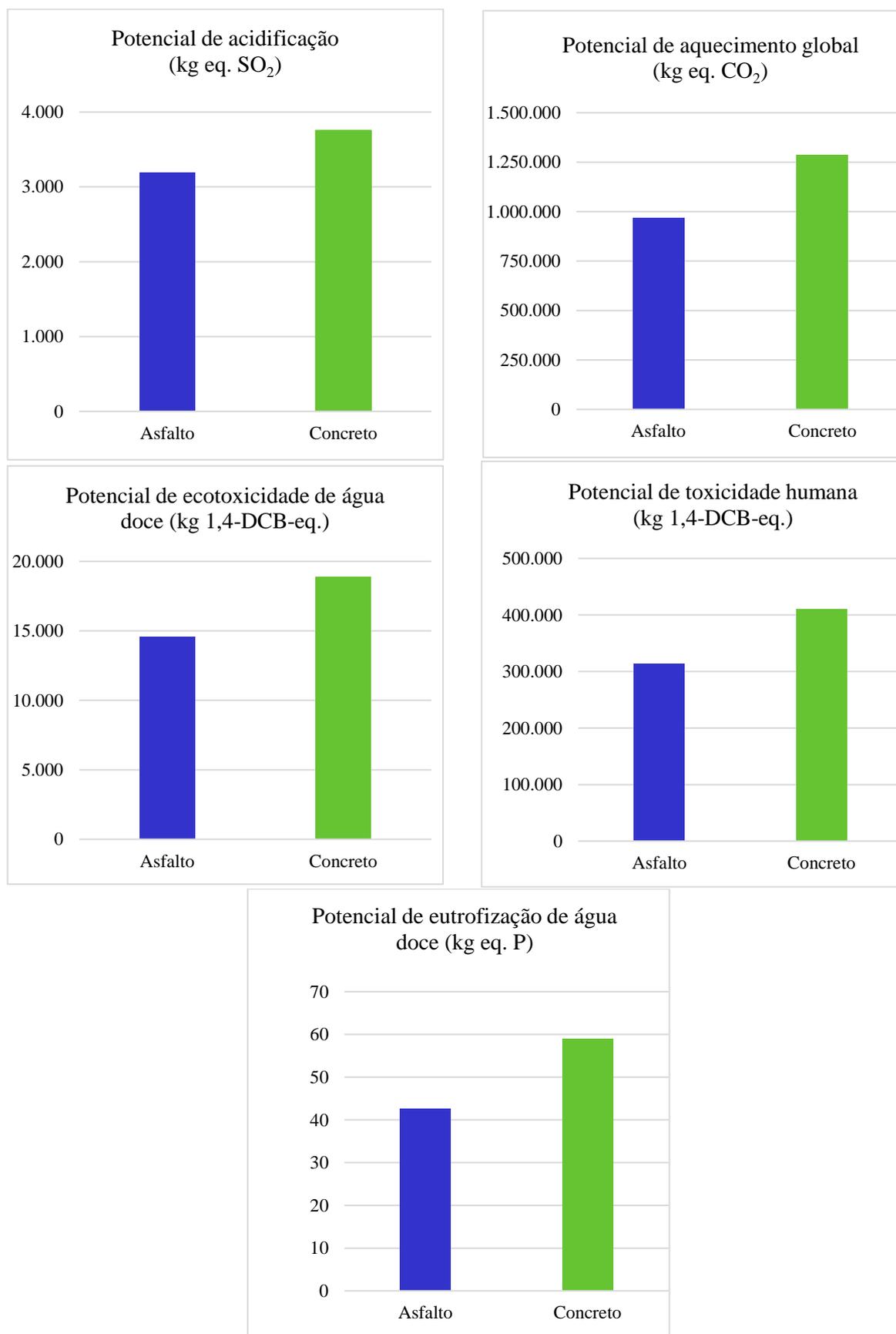
de consumo energético e emissão dos materiais, os quais são parâmetros altamente sensíveis na ACV. Embora a base de dados Ecoinvent seja uma das mais utilizadas, nem todos seus parâmetros são ajustados à realidade da matriz energética brasileira para os materiais empregados nesta análise. De fato, apenas 35% dos itens quantificados no inventário pelo OpenLCA estão adaptados ao contexto brasileiro, o que justifica parte das diferenças observadas nos valores calculados (EcoQuery, [s. d.]).

Outro ponto que justifica parte das diferenças observadas nos resultados dos dois métodos consiste no OpenLCA utilizar processos médios para representar as contribuições dos equipamentos em operação, dispostos em função de faixas de potência do maquinário e sem a determinação exata da distância de deslocamento nas atividades de transporte. A quantificação realizada a partir dos dados do SICRO, por outro lado, dispõe de um maior nível de precisão, relacionando características específicas dos equipamentos, como potência, consumo de combustível e distâncias de transporte associadas.

Não obstante, entende-se que os resultados obtidos pelo OpenLCA contribuem para qualificar o método proposto neste trabalho.

Além dos dados de consumo energético e emissão de CO₂, também foram calculados os impactos ambientais por meio do método ReCiPe 2016 *midpoint*. Os resultados do potencial de acidificação, potencial de aquecimento global, potencial de ecotoxicidade de água doce, potencial de toxicidade humana e potencial de eutrofização de água doce são apresentados nos gráficos da Figura 17 para o pavimento de asfalto e de concreto.

Figura 17 - Avaliação de impactos ambientais para os pavimentos de asfalto e de concreto



Fonte: De autoria própria.

A avaliação dos impactos ambientais das cinco categorias analisadas indica o pavimento asfáltico como a solução de menor impacto ambiental em comparação ao pavimento de concreto. Esse resultado relaciona-se principalmente à maior emissão de CO₂ associada ao pavimento de concreto, dado que os impactos são mais sensíveis ao indicador de emissões de carbono do que ao consumo energético.

A avaliação de impactos desenvolvida por Zhou *et al.* (2022) também apontou maior potencial de aquecimento global para o pavimento de concreto em comparação às soluções asfálticas. Contudo, os resultados desses autores para acidificação, toxicidade da água e toxicidade humana indicaram melhor desempenho do pavimento de concreto. Essas diferenças se relacionam ao fato de que Zhou *et al.* (2022) avaliaram também as etapas de uso e descarte das estruturas, que por sua vez não são atribuídas nesta aplicação. Outrossim, as condições de contorno do estudo de Zhou *et al.* (2022) se inserem no contexto chinês, o que resulta em diferenças significativas nos fatores de emissão associados à produção dos materiais.

4.4. ACCV COM O SICRO

Esta ACCV desenvolve-se a partir dos custos de construção e manutenção das estruturas avaliadas obtidos para o mês-base de abril de 2024 do SICRO, disponíveis no sítio eletrônico da autarquia (DNIT, 2024b). Assim, seguindo a metodologia do DNIT para atribuição das CCUs, precificação dos materiais asfálticos e associação da taxa de BDI, obteve-se o orçamento apresentado na Tabela 16 (pavimento de asfalto) e na Tabela 17 (pavimento de concreto).

Tabela 16 - Orçamento de construção e manutenção do pavimento asfáltico (referência: São Paulo - abril de 2024)

(continua)

Item	Etapa	Código SICRO	Descrição	Un.	Quantidade	Custo unitário (R\$)	BDI (%)	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
1	Pavimentação asfáltica								
1.1	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	13.400,00	1,15	25,01	1,44	19.296,00
1.2	Construção	4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m ³	2.620,00	356,58	25,01	445,76	1.167.891,20
1.3	Construção	4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m ³	2.500,00	392,81	25,01	491,05	1.227.625,00
1.4	Construção	4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m ²	12.200,00	2,39	25,01	2,98	36.356,00
1.5	Construção	4011353	Pintura de ligação	m ²	31.600,00	0,28	25,01	0,35	11.060,00
1.6	Construção	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	864,00	248,50	25,01	310,65	268.401,60
1.7	Construção	4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	2.928,00	248,66	25,01	310,86	910.198,08
1.8	Construção	4011212	Varredura da superfície para execução de revestimento asfáltico	m ²	43.800,00	0,06	25,01	0,08	3.504,00
1.9	Manutenção	4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - faixa III - brita comercial	m ²	16.400,00	6,17	25,01	7,71	126.444,00
1.10	Manutenção	4915661	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico - espessura de 3 cm	m ³	328,00	162,19	25,01	202,76	66.505,28
1.11	Manutenção	4011353	Pintura de ligação	m ²	16.400,00	0,28	25,01	0,35	5.740,00
1.12	Manutenção	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	1.180,80	263,43	25,01	329,32	388.861,06
1.13	Manutenção	4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua do revestimento asfáltico - espessura de 5 cm	m ³	103,70	172,29	25,01	215,38	22.334,91
1.14	Manutenção	4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	103,70	283,45	25,01	354,34	36.745,06
1.15	Manutenção	4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m ³	62,22	432,46	25,01	540,61	33.636,75
1.16	Manutenção	4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m ³	51,85	650,61	25,01	813,32	42.170,64
Subtotal item 1									4.366.769,58

(conclusão)									
Item	Etapa	Código SICRO	Descrição	Un.	Quantidade	Custo unitário (R\$)	BDI (%)	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
2	Aquisição e transporte de material betuminoso								
2.1	Aquisição								
2.1.1	Construção	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	224,76	3.989,74	15,00	4.588,20	1.031.255,90
2.1.2	Construção	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	14,22	3.177,99	15,00	3.654,69	51.969,69
2.1.3	Construção	M2097	Emulsão asfáltica - RR-2C	t	18,18	3.464,25	15,00	3.983,88	72.418,97
2.1.4	Manutenção	M1955	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	t	70,84	5.404,01	15,00	6.214,61	440.266,27
2.1.5	Manutenção	M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	30,67	3.431,03	15,00	3.945,69	121.003,68
2.1.6	Manutenção	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	9,40	3.177,99	15,00	3.654,69	34.361,94
2.1.7	Manutenção	M1950	Emulsão asfáltica com polímero - RC-1C-E	t	38,70	3.937,20	15,00	4.527,78	175.243,20
2.1.8	Manutenção	M2092	Emulsão asfáltica para imprimação	t	0,32	3.144,37	15,00	3.616,03	1.169,94
Subtotal item 2.1									1.927.689,60
2.2	Transporte								
2.2.1	Construção	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	224,76	102,71	15,00	118,11	26.546,71
2.2.2	Construção	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	14,22	85,02	15,00	97,78	1.390,43
2.2.3	Construção	M2097	Emulsão asfáltica - RR-2C	t	18,18	85,02	15,00	97,78	1.777,44
2.2.4	Manutenção	M1955	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	t	70,84	102,71	15,00	118,11	8.367,36
2.2.5	Manutenção	M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	30,67	85,02	15,00	97,78	2.998,65
2.2.6	Manutenção	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	9,40	85,02	15,00	97,78	919,34
2.2.7	Manutenção	M1950	Emulsão asfáltica com polímero - RC-1C-E	t	38,70	85,02	15,00	97,78	3.784,48
2.2.8	Manutenção	M2092	Emulsão asfáltica para imprimação	t	0,32	85,02	15,00	97,78	31,64
Subtotal item 2.2									45.816,05
Subtotal item 2									1.973.505,65
Total do pavimento de asfalto									6.340.275,22

Fonte: De autoria própria.

Tabela 17 - Orçamento de construção e manutenção do pavimento de concreto (referência: São Paulo - abril de 2024)

Item	Etapa	Código SICRO	Descrição	Un.	Quantidade	Custo unitário (R\$)	BDI (%)	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
1	Pavimentação de concreto								
1.1	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	13.300,00	1,15	25,01	1,44	19.152,00
1.2	Construção	4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m ³	1.315,00	419,29	25,01	524,16	689.270,40
1.3	Construção	4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m ²	12.200,00	0,31	25,01	0,39	4.758,00
1.4	Construção	4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m ³	2.684,00	507,88	25,01	634,9	1.704.071,60
1.5	Construção	4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	3.784,44	19,61	25,01	24,51	92.756,62
1.6	Manutenção	4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	53,68	1.439,11	25,01	1799,03	96.571,93
1.7	Manutenção	4915714	Limpeza e enchimento com resina epóxi de fissuras niveladas com abertura máxima de 0,4 mm e profundidade de 20 mm em pavimento de concreto que não atravessam toda a espessura da placa	m	2.440,00	3,08	25,01	3,85	9.394,00
1.8	Manutenção	4915695	Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm com CAP	m	5.185,00	7,29	25,01	9,11	47.235,35
Subtotal item 1									2.663.209,90
2	Aquisição e transporte de material betuminoso								
2.1	Aquisição								
2.1.1	Construção	M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	14,03	3.431,03	15,00	3945,69	55.358,03
2.1.2	Manutenção	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	1,30	3.989,74	15,00	4588,2	5.947,45
Subtotal item 2.1									61.305,48
2.2	Transporte								
2.2.1	Construção	M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	14,03	85,02	15,00	97,78	1.371,85
2.2.2	Manutenção	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	1,30	102,71	15,00	118,11	153,10
Subtotal item 2.2									1.524,95
Subtotal item 2									62.830,44
Total do pavimento de concreto									2.726.040,34

Fonte: De autoria própria.

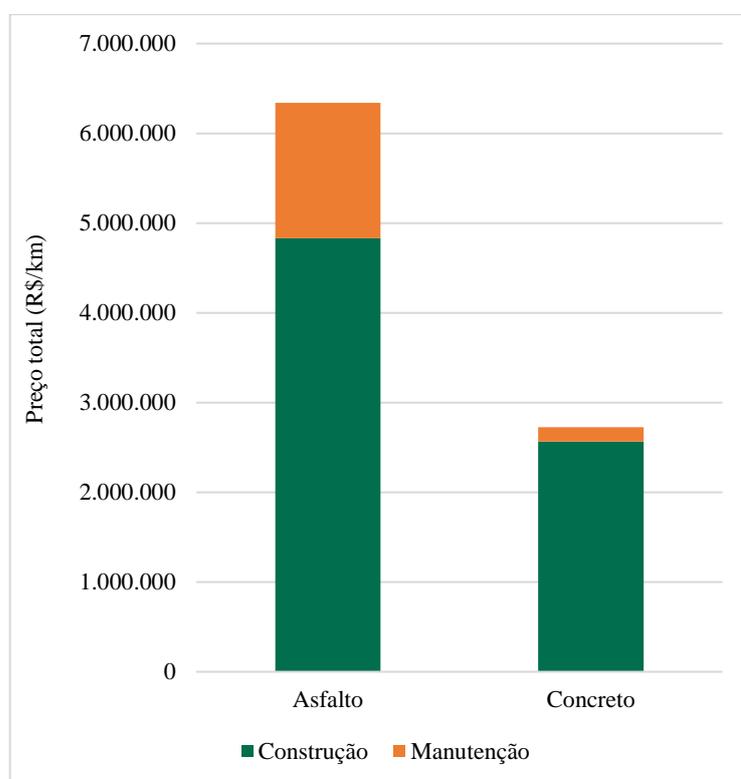
Visando a avaliação dos preços obtidos para cada solução de pavimento, os valores de construção, manutenção e total foram resumidos na Tabela 18 e plotados nos gráficos da Figura 18.

Tabela 18 - Resumo dos preços de construção e manutenção das soluções de pavimento asfáltico e de concreto

Pavimento	Preço de construção (R\$/km)	Preço de manutenção (R\$/km)	Preço total (R\$/km)
Asfalto	4.829.691,03	1.510.584,19	6.340.275,22
Concreto	2.566.738,51	159.301,83	2.726.040,34

Fonte: De autoria própria.

Figura 18 - ACCV das soluções de pavimento asfáltico e de concreto



Fonte: De autoria própria.

O preço total obtido para o pavimento de asfalto é 2,3 vezes o calculado para o pavimento de concreto. Além disso, é evidente pela Figura 18 que as atividades de manutenção desempenham maior contribuição do preço total para o pavimento asfáltico devido à maior necessidade de intervenções de restauração e conservação ao longo do ciclo de vida nessa solução de revestimento.

O melhor desempenho da solução de concreto em relação à asfáltica ao longo de seu ciclo de vida também foi demonstrado nos estudos de Kumari *et al.* (2022), Machado (2020) e Souza (2017).

Os dados obtidos nesta aplicação, assim como nas discussões de Cavalet *et al.* (2019), sugerem que o pavimento de concreto é menos oneroso em ambas as fases do ciclo de vida em foco (*i.e.*, construção e manutenção). Nesse sentido, Beltrão *et al.* (2022) sugerem que o maior preço de construção de pavimentos asfálticos em relação ao de concreto tem vínculo com a elevação no preço do cimento asfáltico, que subiu mais de 147% de janeiro de 2017 a outubro de 2021.

Em que pese o melhor desempenho econômico do pavimento de concreto, até 2019 apenas 1,7% da malha rodoviária nacional utilizava essa solução em detrimento do revestimento asfáltico (Pavimento de concreto, 2024). Essa baixa representatividade pode ser atribuída ao fato de que, historicamente, o pavimento asfáltico era mais barato, o que consolidou uma preferência cultural por sua utilização no Brasil. O mercado nacional demonstrava maior resistência à adoção do pavimento de concreto, sobretudo em razão do desconhecimento técnico e da falta de familiaridade com suas características e processos construtivos. Contudo, esse cenário tem gradualmente se transformado, impulsionado principalmente pelas vantagens econômicas do pavimento rígido de concreto, que incluem maior durabilidade e menores custos de manutenção ao longo do ciclo de vida, tornando-o uma alternativa mais atrativa para investimentos em infraestrutura rodoviária (Pavimento de concreto, 2024).

4.5. CUSTO DE EMISSÃO DE CARBONO

Para o cálculo dos custos de emissão do carbono dos pavimentos de asfalto e de concreto, empregaram-se os conceitos apresentados no item 3.5.

Tratando do valor monetário associado à emissão da tonelada de carbono, autores como Wang *et al.* (2022) adotaram taxas de emissão diferentes para cada etapa do ciclo de vida (*i.e.*, produção dos materiais, transporte e construção), uma vez que seus estudos foram desenvolvidos no contexto da China, a qual dispõe dessa diferenciação nas taxas de emissão praticadas no país.

No âmbito desta aplicação, contudo, não há taxas estabelecidas no cenário brasileiro, tampouco orientadas a uma etapa específica do ciclo de vida. Assim, se tornou necessária a análise dos valores praticados em outros países que têm políticas de monetização implementadas (vide Figura 4).

Diante da elevada heterogeneidade desses dados, entendeu-se como pertinente a adoção da mediana das taxas dos países, as quais são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Definição da taxa de emissão de carbono adotada neste estudo

País	Taxa de carbono (USD/tCO ₂)	País	Taxa de carbono (USD/tCO ₂)	País	Taxa de carbono (USD/tCO ₂)
Uruguai	167,17	França	47,94	África do Sul	10,08
Suíça	132,12	Hungria	38,69	Taiwan	9,12
Liechtenstein	132,12	Islândia	36,50	Colômbia	6,67
Suécia	127,25	Dinamarca	28,20	Chile	5,00
Noruega	107,78	Reino Unido	22,61	México	4,30
Finlândia	99,98	Eslovênia	18,59	Estônia	2,14
Holanda	71,48	Singapura	18,47	Japão	1,90
Irlanda	60,19	Letônia	16,12	Argentina	0,81
Canadá	58,94	Espanha	16,12	Ucrânia	0,76
Luxemburgo	49,90	Albânia	13,11	Mediana adotada	22,61

Fonte: Adaptado de World Bank (2024b).

Para a conversão dessa taxa, de dólares americanos para reais, adotou-se a cotação média informada no sítio eletrônico do Banco Central do Brasil para o mês de abril de 2024 (*i.e.*, R\$ 5,13 por dólar), tal qual o período de referência das composições de custos do SICRO utilizadas nesta ACCV.

Posto isso, a aplicação dessas premissas na Equação 11 resulta nos valores demonstrados na Tabela 20.

Tabela 20 - Dispendios de construção, manutenção e emissão de CO₂ das soluções de pavimento asfáltico e de concreto

Pavimento	Preço de construção e manutenção (R\$/km)	Custo de emissão do CO ₂ (R\$/km)	Preço total de construção, manutenção e emissão do CO ₂ (R\$/km)
Asfalto	6.340.275,22	90.630,36	6.430.905,59
Concreto	2.726.040,34	106.389,48	2.832.429,83

Fonte: De autoria própria.

Em análise aos custos de emissão, nota-se que esses têm menor representatividade no valor total (1,4% para o pavimento de asfalto e 3,8% para o de concreto), uma vez que os dispendios de construção e manutenção são mais significativos.

Não obstante, esta análise evidencia a importância que esses incrementos de monetização das emissões podem desempenhar nos estudos de ACCV. A título de exemplificação dessa importância, pode-se comparar os resultados obtidos na hipótese de se adotar o valor associado ao Uruguai. Nesse cenário, os custos de emissão para o pavimento asfáltico e de concreto são de 670.087,48 R\$/km e 786.604,60 R\$/km, respectivamente,

elevando a representatividade do dispêndio das emissões para 9,6% para o pavimento de asfalto e 22,4% para o pavimento de concreto.

Mais além, salienta-se que a incipiência de publicações e estudos que aplicam a monetização das emissões de CO₂ no contexto da ACCV em infraestruturas de pavimentos rodoviários limitou as análises realizadas neste trabalho. A escassez de referenciais teóricos e dados específicos dificultou o desenvolvimento de abordagens mais detalhadas e robustas, conduzindo a necessidade de adotar um nível de análise mais geral. Essa restrição, embora reconhecida, reforça a importância de futuros estudos que explorem de forma mais aprofundada a integração da monetização de emissões no âmbito da ACCV, especialmente no setor de transportes.

Ainda, é relevante para esta discussão que está em tramitação o Projeto de Lei nº 182/2024, o qual propõe a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), instituindo um mercado regulado de carbono no Brasil (Câmara dos Deputados, 2024). Caso sancionada, essa lei posicionará o Brasil ao lado de nações que já adotam sistemas regulados de precificação de carbono, reforçando sua relevância no cenário global de enfrentamento às mudanças climáticas e promovendo o desenvolvimento econômico sustentável (Câmara dos Deputados, 2024).

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES



5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

Nota-se que este estudo avança no conhecimento científico acerca da avaliação do ciclo de vida ao propor equações e interrelações para serviços de engenharia de infraestrutura de transportes. O emprego do método permite que sejam estimados os impactos ambientais relacionados ao consumo energético e emissão de CO₂ de serviços de obra partir dos dados públicos do SICRO, trazendo inovação no uso desse sistema de referência nacional. Além disso, o método auxilia na comparação de diferentes soluções técnicas de engenharia à luz de fatores relacionados à sustentabilidade.

A utilização dos conceitos relacionados à ACV para avaliação do impacto ambiental já é prática consolidada em diversos países (Zhou *et al.*, 2022; Zapata e Gambatese, 2005). Dessa forma, o método apresentado neste estudo é uma ferramenta importante para robustecer as avaliações referentes à sustentabilidade ambiental em projetos de infraestrutura no Brasil.

Dentre as atividades envolvidas no método proposto, a obtenção das quantidades totais de materiais e equipamentos foi a que consumiu mais tempo e recursos, uma vez que foi necessário acessar cada uma das composições de custos auxiliares e relacioná-las com o serviço principal quantificado. Essa atividade requer certo conhecimento e familiaridade com o SICRO, a fim de garantir que as associações sejam feitas de maneira correta e que as adaptações sejam devidamente incorporadas ao inventário resultante da decomposição das CCUs.

Outro ponto de dificuldade enfrentado na realização do estudo foi a definição da energia embutida (EE) e do fator de emissão de CO₂ (FCO₂) dos materiais em razão da escassez de referências oficiais que representem adequadamente a realidade brasileira para todos os insumos. A adoção de dados internacionais deve ser vista com cautela, pois esses parâmetros sofrem influência das cadeias produtivas e matrizes energéticas, que podem ser substancialmente diferentes entre países.

A discrepância entre valores de EE e FCO₂ informados por diferentes autores para um mesmo material chama atenção nas pesquisas por esses dados. A brita, por exemplo, tem um fator de emissão de CO₂ de 1,90 kgCO₂/t segundo CBCS (2014), enquanto Santoro e Kripka (2016) indicam 4,01 kgCO₂/t. Essas disparidades se relacionam principalmente aos métodos extrativos, processamentos e demais condições de contorno associados à produção da brita nos dois cenários de obtenção dos dados. Como discutido previamente, esses parâmetros

desempenham elevada sensibilidade na ACV, sendo de extrema importância que o usuário volte sua atenção para o uso de valores que melhor representam a condição avaliada.

Nesse sentido, é ideal que a aplicação do método descrito neste trabalho para uma condição real de projeto seja acompanhada pelo estudo e atribuição de valores de energia embutida e do fator de emissão de CO₂ adequados às especificações dos materiais e equipamentos efetivamente empregados naquele caso.

Em relação ao cálculo das operações de transporte, observou-se que os parâmetros para obtenção do consumo de combustível dos equipamentos requerem certo nível de maturidade do projeto para melhor acurácia e confiabilidade dos resultados. Isso porque a Equação 3 considera a DMT e a velocidade de transporte, que dependem do plano logístico de fornecimento e aquisição dos materiais e das condições de revestimento da via, respectivamente.

No âmbito da qualificação da ACV por meio do OpenLCA, a característica *open source* desse *software* o transformam em uma valiosa ferramenta no âmbito dos estudos de ACV em todo o mundo. Contudo, cabe pontuar que o uso do programa requer treinamento específico, uma vez que sua interface é pouco intuitiva. Outrossim, a ausência de entidades que retratem os materiais e equipamentos no contexto brasileiro consistiu no maior ponto de fragilidade dos resultados obtidos pelo OpenLCA.

Ainda sobre a qualificação da ACV, a análise dos impactos ambientais para as cinco categorias avaliadas enriqueceu os resultados do estudo, apontando o melhor desempenho do pavimento asfáltico para esses indicadores. Além disso, evidenciou-se que os resultados de potencial de impacto ambiental das categorias analisadas têm maior relação com a emissão de dióxido de carbono do que com o indicador de consumo energético das estruturas.

A ACCV desenvolvida para as estruturas de pavimento comparadas neste estudo aponta a solução de concreto como mais vantajosa em termos econômicos. Historicamente, o pavimento de concreto era conhecido como solução mais onerosa que a asfáltica em termos de construção. Todavia, essa quebra de paradigma observada nos resultados deste estudo também foi constatada por outros autores, como Beltrão *et al.* (2022), que tiveram menores preços de construção para o pavimento de concreto.

Em relação aos gastos de manutenção da ACCV, os resultados demonstram a menor representatividade desses dispêndios para a solução de concreto, principalmente quando

comparada ao pavimento asfáltico, uma vez que esse segundo requer maiores intervenções de restauração para manutenção do nível de serviço nos 20 anos analisados. Tais resultados vão ao encontro das pesquisas de Machado (2020) e Souza (2017).

A principal limitação observada no processo de definição dos custos de emissão de carbono consiste na ausência de política estabelecida no Brasil para monetização das emissões excedentes de CO₂. Isso faz com que não seja possível estabelecer com assertividade qual massa de carbono emitido que deve ser efetivamente monetizada para um empreendimento de infraestrutura. Outrossim, não há uma taxa de precificação estabelecida no País, o que incorpora mais incertezas e tornam os resultados gerados menos tangíveis, principalmente diante da necessidade de se adotar a mediana do valor praticado no resto do mundo.

Não obstante, a monetização das emissões de carbono tem se difundido e se consolidado em todo o mundo nos últimos anos em razão da crescente preocupação no controle das emissões. Esse movimento global dá indícios de que, em um horizonte próximo, serão implementadas políticas e diretrizes para taxação das emissões de carbono no Brasil. Assim, o conceito de aplicação da monetização do CO₂ na ACCV de projetos de infraestrutura de transportes ganha importância ao se apresentar na vanguarda desse tipo de estudo no Brasil, de forma que trabalhos futuros podem se aprofundar no tema para propor mecanismos de implementação e taxação do carbono no País.

Dentre as limitações de escopo do método, destaca-se a não consideração das contribuições relativas à mão de obra e à manufatura dos equipamentos, como previamente mencionado. O método tampouco adentra no CE e ECO₂ de custos indiretos da obra, como administração local e canteiro de obras. Assim, proposições similares podem abordar também essas contribuições, possibilitando a avaliação de parâmetros relacionados à sustentabilidade ambiental de todos os elementos associados a um empreendimento.

Ainda, pesquisas futuras voltadas à consolidação de uma base de dados nacional com valores de EE e FCO₂ para os materiais do SICRO podem constituir importante contribuição para fomentar o emprego de métodos voltados a análises dos impactos ambientais de empreendimentos de infraestrutura de transportes.

É relevante salientar que os resultados obtidos neste estudo acerca dos desempenhos comparativos dos pavimentos asfáltico e de concreto, tanto em termos econômicos quanto

ambientais, devem ser avaliados com cuidado no sentido de extrapolá-los a condições de contorno diferentes das delimitadas neste exemplo.

Finalmente, é possível constatar que os objetivos propostos nesta pesquisa foram atingidos, uma vez que a aplicação do método proposto permitiu o cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂ a partir dos dados do SICRO, a qualificação da ACV por intermédio do *software* OpenLCA, a ACCV com a metodologia do SICRO e ainda o cálculo dos custos de emissão de carbono das estruturas analisadas.

REFERÊNCIAS



REFERÊNCIAS

- ARYAN, Y.; DIKSHIT, A. K.; SHINDE, A. M. **A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures**. [S. l.]: Academic Press, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INFRAESTRUTURA E DE INDÚSTRIAS DE BASE. **Livro Azul da Infraestrutura: Uma radiografia dos projetos de infraestrutura no Brasil**. [S. l.: s. n.], 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. [S. l.: s. n.], 2009a. Disponível em: www.abnt.org.br.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. [S. l.: s. n.], 2009b. Disponível em: www.abnt.org.br.
- BARE, J. C. *et al.* Life cycle impact assessment workshop summary. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 319–326, 2000.
- BELTRÃO, L. M. P. B. *et al.* Análise comparativa de custos de construção de pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos. *In:* , 2022, Bento Gonçalves. **24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)**. Bento Gonçalves: [s. n.], 2022.
- BERLINER, C. **Gerenciamento de custos em indústrias avançadas**. [S. l.]: TA Queiroz, 1992.
- BEUREN, I. M.; SCHAEFFER, V. **Análise do custos de ciclo de vida do produto: uma abordagem teórica**. [S. l.: s. n.], 1997.
- BOONPOKE, A. *et al.* Environmental impact evaluation of road pavements using life cycle assessment tool. **Lowland Technology International**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 117–124, 2018.
- BOSTANCI, S. C.; LIMBACHIYA, M.; KEW, H. Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 189, p. 176–196, 2018.
- BRASIL. **Decreto nº 7.983 - Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, e dá outras providências**. Brasil: Diário Oficial da União, 8 abr. 2013. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/decreto/d7983.htm. Acesso em: 26 ago. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 14.133 - Estabelece normas gerais de licitação e contratação para as Administrações Públicas diretas, autárquicas e fundacionais da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios**. Brasil: 1 abr. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/114133.htm. Acesso em: 26 ago. 2024.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei nº 182/2024**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=1548579&fichaAmigavel=nao>. Acesso em: 22 dez. 2024.

CARVALHO, J. de; JOHN, V. M. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil: estudo de caso - comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos**. 2002. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2002.

CAVALET, V. N. *et al.* Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de cimento Portland aplicado em rodovia de alto tráfego. *In:* , 2019, Balneário Camburiú. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET**. Balneário Camburiú: [s. n.], 2019.

CELAURO, C.; CARDELLA, A.; GUERRIERI, M. LCA of Different Construction Choices for a Double-Track Railway Line for Sustainability Evaluations. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 6, 2023.

CHOU, J.-S.; YEH, K.-C. Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 101, p. 137–147, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2023**. Brasília: [s. n.], 2023.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: https://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/ACV-m/CBCS_ACV-blocos-concreto.pdf. Acesso em: 21 ago. 2024.

COSTA, H. **Análise de custos de ciclo de vida relativa a pavimentos rodoviários flexíveis**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: [s. n.], 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos**. Brasília: [s. n.], 2024a. 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: 4 set. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Instrução Normativa nº 62/DNIT SEDE, de 17 de setembro de 2021. Regula critérios para utilização dos custos referenciais dispostos nos sistemas de custos referenciais do DNIT nos casos especiais que disciplina. **Boletim Administrativo**: Brasil, n. Edição nº 178, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. Brasília, DF: [s. n.], 2017a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Custos Médios Gerenciais - Volume 01: Manual de Metodologia**. Brasília, DF: [s. n.], 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica - Microrrevestimento asfáltico - Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_035_2018_es.pdf. Acesso em: 9 set. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_031_2006_es.pdf. Acesso em: 9 set. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Portaria nº 1.977, 25 de outubro de 2017**. Brasil: Diário Oficial da União, 2017b. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/documentos/Portaria1977.2017DGProdutosasfálticos.pdf>. Acesso em: 1 set. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Relatório Analítico de Composição de Custos do SICRO**. [s. l.], 2024b. 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/sudeste/sudeste. Acesso em: 26 ago. 2024.

DI DOMÊNICO, M.; DA SILVA, T. L.; RIBEIRO, L. A. Avaliação de Ciclo de Vida dos sistemas construtivos de uma unidade habitacional de interesse social. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2021.

ECOQUERY. **Database Search**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/search>. Acesso em: 13 set. 2024.

EDP INTERNACIONAL AB. **The EPD Portal**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://portal.environdec.com/>. Acesso em: 4 set. 2024.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Life-Cycle Cost Analysis Primer**. Washington, DC: [s. n.], 2002.

GAO, Y. L. **Research of Building's Life Cycle Carbon Cost Calculation**. Pequim, China: [s. n.], 2017.

GRAEL, P. F. F. *et al.* Life cycle inventory and impact assessment for an asphalt pavement road construction—a case study in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 402–416, 2021.

GUINÉE, J. Handbook on life cycle assessment - Operational guide to the ISO standards. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 255, 2001.

GULOTTA, T. M.; MISTRETTA, M.; PRATICÒ, F. G. A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 673, p. 585–593, 2019. Disponível em: Acesso em: 19 out. 2024.

HAUSCHILD, M. Z. *et al.* Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 683–697, 2013.

HORVATH, A.; HENDRICKSON, C. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements. **Transportation Research Record**, [s. l.], n. 1626, p. 105–113, 1998.

HUNT, R. G.; FRANKLIN, W. E. LCA - How it Came about - Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 4–7, 1996.

KENDALL, A. **Life Cycle Assessment for Pavement: Introduction**. Davis, CA: FHWA, 2012.

KLÖPFER, W. Life Cycle Assessment: From the beginning to the current state. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 223–228, 1997.

KUMARI, M.; GUPTA, P.; DESHWAL, S. S. Integrated Life Cycle Cost Comparison and Environment Impact Analysis of the Concrete and Asphalt Roads. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 60, p. 345–350, 2022.

LIU, Y.; WANG, Y.; AN, D. Life-cycle CO₂ emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China. **International Journal of Sustainable Transportation**, [s. l.], v. 12, n. 7, p. 497–509, 2018.

LUO, W. *et al.* Life cycle carbon cost of buildings under carbon trading and carbon tax system in China. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 66, 2021.

LUO, Wei *et al.* Life cycle carbon cost of buildings under carbon trading and carbon tax system in China. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 66, 2021.

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

MACHADO, C. N. **Análise do Ciclo de Vida (ACV) de Pavimento Asfáltico e Rígido na BR-163/364/MT**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade La Salle, Canoas, RS, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/9>. Acesso em: 28 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): About Carbon Pricing**. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://unfccc.int/about-us/regional-collaboration-centres/the-ciaca/about-carbon-pricing#Which-types-of-carbon-pricing-exist?> Acesso em: 27 ago. 2024.

PARK, K. *et al.* Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 129, n. 1, p. 25–31, 2003.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “mY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 57, p. 95–102, 2013.

PAVIMENTO DE CONCRETO. **Aplicação de pavimento rígido cresce nas estradas federais**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://pavimentodeconcreto.com/aplicacao-de-pavimento-rigido-cresce-nas-estradas-federais/>. Acesso em: 22 dez. 2024.

ROUDEBUSH, W. H. Environmental value engineering (EVE) Environmental life cycle assessment of concrete and asphalt highway pavement systems. **PCA R&D**, [s. l.], v. 2088, 1996.

RSMEANS. **About RSMeans Data from Gordian**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.rsmeans.com/info/contact/about-us>. Acesso em: 27 ago. 2024.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. **Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review**. [S. l.: s. n.], 2011a.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. **Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps**. [S. l.: s. n.], 2011b.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 35–49, 2016.

SAVIETTO, J. P. **Análise de Impactos Ambientais da Restauração de Pavimentos Asfálticos pela Avaliação do Ciclo de Vida**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SHARIFI, F. *et al.* Regional CO2 impact assessment of road infrastructure improvements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], v. 90, 2021.

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO. **Calculadora do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 4 set. 2024.

SIVA RAMA KRISHNA, U.; NAGA SATISH KUMAR, C. A case study on maintenance of bituminous concrete pavement considering life cycle cost analysis and carbon footprint estimation. **International Journal of Construction Management**, [s. l.], v. 22, n. 9, p. 1756–1764, 2022.

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

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energética de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THACKER, S. *et al.* **Infrastructure for climate action**. Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2021.

WALLS III, M. R.; SMITH, J. **Life-cycle cost analysis in pavement design**. Washington: [s. n.], 1998.

WANG, J. *et al.* Integrated Carbon Emissions and Carbon Costs for Bridge Construction Projects Using Carbon Trading and Tax Systems—Taking Beijing as an Example. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 20, 2022.

WORLD BANK. **Carbon Pricing Dashboard: What is Carbon Pricing?**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/what-carbon-pricing>. Acesso em: 27 ago. 2024.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing Dashboard**. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Competitiveness Report 2019**. Cologny, Switzerland: [s. n.], 2019.

ZAPATA, P.; GAMBATESE, J. A. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. **Journal of Infrastructure Systems**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 9–20, 2005.

ZHOU, X. *et al.* Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: Comparative cases in Shanxi Province. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 315, 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Planilha de cálculo de CE_{pro} e ECO_{2pro} para todos as CCUs do exemplo de aplicação

(continua)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Tipo material	Massa por material			Dados material		Resultados por CCU	
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na principal	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar		Quant. princ. X quant. aux.	Conversão para massa (t/un)	Massa de material (t/UF)	EE (MJ/t)	FCO ₂ (kgCO ₂ /t)	CE _{pro} (MJ/UF)	ECO _{2pro} (kgCO ₂ /UF)
4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m ³	6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	1,00000	M0005	Brita 0	m ³	0,53076	Brita	0,53076	1,50000	0,79614	49,09	2,33	39,08	1,86
							M0191	Brita 1	m ³	0,14700	Brita	0,14700	1,50000	0,22050	49,09	2,33	10,82	0,51
							M0192	Brita 2	m ³	0,26060	Brita	0,26060	1,50000	0,39090	49,09	2,33	19,19	0,91
							M1135	Pó de pedra	m ³	0,52829	Brita	0,52829	1,50000	0,79244	49,09	2,33	38,90	1,85
4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m ³	6416042	Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	1,00000	M0005	Brita 0	m ³	0,69667	Brita	0,69667	1,50000	1,04501	49,09	2,33	51,30	2,44
							M0191	Brita 1	m ³	0,14667	Brita	0,14667	1,50000	0,22001	49,09	2,33	10,80	0,51
							M0192	Brita 2	m ³	0,07333	Brita	0,07333	1,50000	0,11000	49,09	2,33	5,40	0,26
							M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	88,00000	Cimento	88,00000	0,00100	0,08800	4.055,50	689,05	356,88	60,64
							M1135	Pó de pedra	m ³	0,49133	Brita	0,49133	1,50000	0,73700	49,09	2,33	36,18	1,72
4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m ²	M0005	Brita 0	m ³	0,00667	-	-	-	-	Brita	0,00667	1,50000	0,01001	49,09	2,33	0,49	0,02
			M2097	Emulsão asfáltica - RR-2C	t	0,00149	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00149	1,00000	0,00149	51.000,00	307,00	75,99	0,46
4011353	Pintura de ligação	m ²	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00045	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00045	1,00000	0,00045	51.000,00	307,00	22,95	0,14
4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	1,02000	M0028	Areia média	m ³	0,32475	Areia	0,33125	1,50000	0,49687	96,70	6,26	48,05	3,11
							M0005	Brita 0	m ³	0,06245	Brita	0,06370	1,50000	0,09555	49,09	2,33	4,69	0,22
							M0191	Brita 1	m ³	0,06245	Brita	0,06370	1,50000	0,09555	49,09	2,33	4,69	0,22
							M0344	Cal hidratada - a granel	kg	56,20000	Cal hidratada	57,32400	0,00100	0,05732	4.527,00	732,10	259,51	41,97
							M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,06323	Materiais asfálticos	0,06449	1,00000	0,06449	51.000,00	307,00	3.289,22	19,80
							M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000	Óleo tipo A1	8,16000	0,00100	0,00816	40,15	3,11	0,33	0,03
							M1103	Pedrisco	m ³	0,13739	Brita	0,14014	1,50000	0,21021	49,09	2,33	10,32	0,49
4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	6416143	Usinagem de concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	1,02000	M0028	Areia média	m ³	0,24214	Areia	0,24698	1,50000	0,37047	96,70	6,26	35,82	2,32
							M0005	Brita 0	m ³	0,05765	Brita	0,05880	1,50000	0,08820	49,09	2,33	4,33	0,21
							M0191	Brita 1	m ³	0,17820	Brita	0,18176	1,50000	0,27265	49,09	2,33	13,38	0,64
							M0344	Cal hidratada - a granel	kg	51,88000	Cal hidratada	52,91760	0,00100	0,05292	4.527,00	732,10	239,56	38,74
							M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,05660	Materiais asfálticos	0,05773	1,00000	0,05773	51.000,00	307,00	2.944,33	17,72
							M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000	Óleo tipo A1	8,16000	0,00100	0,00816	40,15	3,11	0,33	0,03
							M1103	Pedrisco	m ³	0,11635	Brita	0,11868	1,50000	0,17802	49,09	2,33	8,74	0,42
4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m ²	M1950	Emulsão asfáltica com polímero - RC-1C-E	t	0,00236	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00236	1,00000	0,00236	51.000,00	307,00	120,36	0,72
			M0222	Filer calcário	kg	0,33750	-	-	-	-	Filer calcário	0,33750	0,00100	0,00034	186,63	3,92	0,06	0,00
			6416036	Usinagem de agregados para microrrevestimento a frio com espessura de 0,8 cm até 1,5 cm - brita comercial	m ³	0,01500	M0005	Brita 0	m ³	0,20000	Brita	0,00300	1,50000	0,00450	49,09	2,33	0,22	0,01
							M1135	Pó de pedra	m ³	0,80000	Brita	0,01200	1,50000	0,01800	49,09	2,33	0,88	0,04
4011353	Pintura de ligação	m ²	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00045	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00045	1,00000	0,00045	51.000,00	307,00	22,95	0,14
4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	6416248	Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	1,02000	M0028	Areia média	m ³	0,37647	Areia	0,38400	1,50000	0,57600	96,70	6,26	55,70	3,60
							M0005	Brita 0	m ³	0,03137	Brita	0,03200	1,50000	0,04800	49,09	2,33	2,36	0,11
							M0191	Brita 1	m ³	0,04706	Brita	0,04800	1,50000	0,07200	49,09	2,33	3,53	0,17
							M0344	Cal hidratada - a granel	kg	70,58000	Cal hidratada	71,99160	0,00100	0,07199	4.527,00	732,10	325,91	52,71
							M1955	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	t	0,05882	Materiais asfálticos	0,06000	1,00000	0,06000	51.000,00	307,00	3.059,82	18,42
							M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000	Óleo tipo A1	8,16000	0,00100	0,00816	40,15	3,11	0,33	0,03
							M1103	Pedrisco	m ³	0,12549	Brita	0,12800	1,50000	0,19200	49,09	2,33	9,43	0,45

(continua)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Tipo material	Massa por material			Dados material		Resultados por CCU						
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na principal	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar		Quant. princ. X quant. aux.	Conversão para massa (t/un)	Massa de material (t/UF)	EE (MJ/t)	FCO ₂ (kgCO ₂ /t)	CE _{pro} (MJ/un)	ECO _{2pro} (kgCO ₂ /un)					
4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m³	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	1,00000	M0028	Areia média	m³	0,37968	Areia	0,37968	1,50000	0,56952	96,70	6,26	55,07	3,56					
							M0005	Brita 0	m³	0,20688	Brita	0,20688	1,50000	0,31032	49,09	2,33	15,23	0,72					
							M0191	Brita 1	m³	0,45026	Brita	0,45026	1,50000	0,67539	49,09	2,33	33,16	1,58					
							M0345	Cal hidratada - saco	kg	87,63000	Cal hidratada	87,63000	0,00100	0,08763	4.527,00	732,10	396,70	64,15					
							M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,18255	Materiais asfálticos	0,18255	1,00000	0,18255	51.000,00	307,00	9.310,05	56,04					
							M1103	Pedrisco	m³	0,36509	Brita	0,36509	1,50000	0,54764	49,09	2,33	26,88	1,28					
4011353	Pintura de ligação	m²	33,33333	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00045	Materiais asfálticos	0,01500	1,00000	0,01500	51.000,00	307,00	765,00	4,61								
4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m³	M2092	Emulsão asfáltica para imprimação	t	0,00520	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00520	1,00000	0,00520	51.000,00	307,00	265,20	1,60					
			4915625	Solo melhorado com cimento para base de remendo profundo	m³	0,80000	M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	kg	61,89000	Cimento	49,51200	0,00100	0,04951	4.055,50	689,05	200,80	34,12					
							M0028	Areia média	m³	0,37968	Areia	0,07594	1,50000	0,11390	96,70	6,26	11,01	0,71					
							M0005	Brita 0	m³	0,20688	Brita	0,04138	1,50000	0,06206	49,09	2,33	3,05	0,14					
							M0191	Brita 1	m³	0,45026	Brita	0,09005	1,50000	0,13508	49,09	2,33	6,63	0,32					
							M0345	Cal hidratada - saco	kg	87,63000	Cal hidratada	17,52600	0,00100	0,01753	4.527,00	732,10	79,34	12,83					
							M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,18255	Materiais asfálticos	0,03651	1,00000	0,03651	51.000,00	307,00	1.862,01	11,21					
			M1103	Pedrisco	m³	0,36509	Brita	0,07302	1,50000	0,10953	49,09	2,33	5,38	0,26									
4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m³	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	1,00000	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00900	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00900	1,00000	0,00900	51.000,00	307,00	459,00	2,76	
							M0028	Areia média	m³	0,37968	Areia	0,37968	1,50000	0,56952	96,70	6,26	55,07	3,56					
							M0005	Brita 0	m³	0,20688	Brita	0,20688	1,50000	0,31032	49,09	2,33	15,23	0,72					
							M0191	Brita 1	m³	0,45026	Brita	0,45026	1,50000	0,67539	49,09	2,33	33,16	1,58					
							M0345	Cal hidratada - saco	kg	87,63000	Cal hidratada	87,63000	0,00100	0,08763	4.527,00	732,10	396,70	64,15					
							M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,18255	Materiais asfálticos	0,18255	1,00000	0,18255	51.000,00	307,00	9.310,05	56,04					
							M1103	Pedrisco	m³	0,36509	Brita	0,36509	1,50000	0,54764	49,09	2,33	26,88	1,28					
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m³	6416092	Usinagem para sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m³	1,00000	M0005	Brita 0	m³	0,33486	Brita	0,33486	1,50000	0,50229	49,09	2,33	24,66	1,17					
							M0191	Brita 1	m³	0,31725	Brita	0,31725	1,50000	0,47588	49,09	2,33	23,36	1,11					
							M0192	Brita 2	m³	0,22912	Brita	0,22912	1,50000	0,34368	49,09	2,33	16,87	0,80					
							M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	100,00000	Cimento	100,00000	0,00100	0,10000	4.055,50	689,05	405,55	68,91					
							M1135	Pó de pedra	m³	0,65211	Brita	0,65211	1,50000	0,97817	49,09	2,33	48,02	2,28					
4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m²	M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,00115	-	-	-	-	Materiais asfálticos	0,00115	1,00000	0,00115	51.000,00	307,00	58,65	0,35					
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m³	6416090	Usinagem para pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m³	1,00000	M0003	Aço CA 25	kg	4,68000	-	-	-	-	Aço	4,68000	0,00100	0,00468	12.037,50	743,45	56,34	3,48	
							M0004	Aço CA 50	kg	1,25000	-	-	-	-	-	Aço	1,25000	0,00100	0,00125	12.037,50	743,45	15,05	0,93
							M0075	Arame liso recozido em aço-carbono - D = 1,24 mm (18 BWG)	kg	0,05000	-	-	-	-	-	Aço	0,05000	0,00100	0,00005	12.037,50	743,45	0,60	0,04
							M1377	Treliça nervurada eletrossoldada em aço CA 60	kg	2,20000	-	-	-	-	-	Aço	2,20000	0,00100	0,00220	12.037,50	743,45	26,48	1,64
							M0030	Aditivo plastificante e retardador de pega para concreto e argamassa	kg	0,89000	-	-	-	-	-	Aditivo plastificante	0,89000	0,00100	0,00089	3.560,00	136,00	3,17	0,12
							M0028	Areia média	m³	0,49730	Areia	0,49730	1,50000	0,74595	96,70	6,26	72,13	4,67					
							M0191	Brita 1	m³	0,37750	Brita	0,37750	1,50000	0,56625	49,09	2,33	27,80	1,32					
							M0192	Brita 2	m³	0,37750	Brita	0,37750	1,50000	0,56625	49,09	2,33	27,80	1,32					
							M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	350,00000	Cimento	350,00000	0,00100	0,35000	4.055,50	689,05	1.419,43	241,17					

(conclusão)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Tipo material	Massa por material			Dados material		Resultados por CCU					
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na principal	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar		Quant. princ. X quant. aux.	Conversão para massa (t/un)	Massa de material (t/UF)	EE (MJ/t)	FCO ₂ (kgCO ₂ /t)	CE _{pro} (MJ/un)	ECO _{2pro} (kgCO ₂ /un)				
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	M1136	Cordão de polietileno expandido de baixa densidade - D = 10,0 mm	m	1,00000	-	-	-	-	-	-	1,00000	0,00000	0,00000	95.000,00	1.100,00	0,14	0,00			
			M2150	Selante elástico à base de poliuretano e asfalto	kg	0,07920	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07920	0,00100	0,00008	51.000,00	307,00	4,04	0,02	
4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	M1387	Adesivo estrutural à base de resina epóxi de média viscosidade	kg	9,56250	-	-	-	-	-	-	-	9,56250	0,00100	0,00956	137.000,00	5.708,00	1.310,06	54,58		
			M0769	Lona plástica - E = 200 micra	m ²	5,00000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,00000	0,00006	0,00030	95.000,00	1.100,00	28,50	0,33
			M0030	Aditivo plastificante e retardador de pega para concreto e argamassa	kg	1,05710	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,05710	0,00100	0,00106	3.560,00	136,00	3,76	0,14
			M0082	Areia média lavada	m ³	0,59363	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,59363	1,50000	0,89045	96,70	6,26	86,11	5,57
			M0191	Brita 1	m ³	0,36754	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36754	1,50000	0,55131	49,09	2,33	27,06	1,29
			M0192	Brita 2	m ³	0,36754	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36754	1,50000	0,55131	49,09	2,33	27,06	1,29
M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	kg	352,36529	-	-	-	-	-	-	-	-	-	352,36529	0,00100	0,35237	4.055,50	689,05	1.429,02	242,80			
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	M1136	Cordão de polietileno expandido de baixa densidade - D = 10,0 mm	m	1,00000	-	-	-	-	-	-	-	1,00000	0,00000	0,00000	95.000,00	1.100,00	0,14	0,00		
			M2150	Selante elástico à base de poliuretano e asfalto	kg	0,07920	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07920	0,00100	0,00008	51.000,00	307,00	4,04	0,02
4915695	Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm em pavimento de concreto com CAP	m	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,00025	-	-	-	-	-	-	-	0,00025	1,00000	0,00025	51.000,00	307,00	12,75	0,08		
4915714	Limpeza e enchimento com resina epóxi de fissuras niveladas com abertura máxima de 0,4 mm e profundidade de 20 mm em pavimento de concreto que não atravessam toda a espessura da placa	m	M1390	Adesivo estrutural à base de resina epóxi de baixa viscosidade	kg	0,01100	-	-	-	-	-	-	-	0,01100	0,00100	0,00001	137.000,00	5.708,00	1,51	0,06		

Fonte: De autoria própria.

APÊNDICE B – Planilha de cálculo de CE_{tra} e ECO_{2tra} para todos as CCUs do exemplo de aplicação

(continua)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Parâmetros transporte							Dados combustível		Resultados por CCU			
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Massa de material usado (t/un)	Equipamento transportador	Coef. consumo combustível (l/kWh)	Potência (kW)	Capacidade do equip. (t)	DMT (km)	Velocidade (km/h)	Consumo de combustível (l/UF)	EE _{com} (MJ/l)	FCO _{2com} (kgCO ₂ /l)	CE _{tra} (MJ/UF)	ECO _{2tra} (kgCO ₂ /UF)	
4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m³	6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m³	1,00000	-	-	-	-	2,20000	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	9,00	40	1,73712	35,21	2,29	61,16	3,98	
							M0005	Brita 0	m³	0,53076	0,79614	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	2,32827	35,21	2,29	81,98	5,33	
							M0191	Brita 1	m³	0,14700	0,22050	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,64484	35,21	2,29	22,70	1,48	
							M0192	Brita 2	m³	0,26060	0,39090	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	1,14317	35,21	2,29	40,25	2,62	
							M1135	Pó de pedra	m³	0,52829	0,79244	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	2,31743	35,21	2,29	81,60	5,31	
4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m³	6416042	Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita comercial em usina de 300 t/h	m³	1,00000	-	-	-	-	2,20000	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	9,00	40	1,73712	35,21	2,29	61,16	3,98	
							M0005	Brita 0	m³	0,69667	1,04501	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	3,05606	35,21	2,29	107,60	7,00	
							M0191	Brita 1	m³	0,14667	0,22001	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,64339	35,21	2,29	22,65	1,47	
							M0192	Brita 2	m³	0,07333	0,11000	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,32167	35,21	2,29	11,33	0,74	
							M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	88,00000	0,08800	Caminhão silo com capacidade de 30 m³	0,19	265	31,290	50,00	60	0,23601	35,21	2,29	8,31	0,54	
M1135	Pó de pedra	m³	0,49133	0,73700	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	2,15530	35,21	2,29	75,89	4,94								
4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m²	M0005	Brita 0	m³	0,00667	-	-	-	-	0,01001	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,02926	35,21	2,29	1,03	0,07	
			M2097	Emulsão asfáltica - RR-2C	t	0,00149	-	-	-	-	-	0,00149	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	229,58	60	0,01852	35,21	2,29	0,65	0,04
4011353	Pintura de ligação	m²	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00045	-	-	-	-	0,00045	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	229,58	60	0,00559	35,21	2,29	0,20	0,01	
4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	1,02000	-	-	-	-	1,02000	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	9,00	40	0,80539	35,21	2,29	28,36	1,84	
							M0028	Areia média	m³	0,32475	0,49687	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	1,45306	35,21	2,29	51,16	3,33	
							M0005	Brita 0	m³	0,06245	0,09555	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,27943	35,21	2,29	9,84	0,64	
							M0191	Brita 1	m³	0,06245	0,09555	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,27943	35,21	2,29	9,84	0,64	
							M0344	Cal hidratada - a granel	kg	56,20000	0,05732	Caminhão silo com capacidade de 30 m³	0,19	265	31,290	50,00	60	0,15374	35,21	2,29	5,41	0,35	
							M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,06323	0,06449	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	299,47	60	1,04568	35,21	2,29	36,82	2,39	
							M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000	0,00816	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	50,00	60	0,02209	35,21	2,29	0,78	0,05	
M1103	Pedrisco	m³	0,13739	0,21021	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,61474	35,21	2,29	21,64	1,41								
4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	6416143	Usinagem de concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	1,02000	-	-	-	-	1,02000	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	9,00	40	0,80539	35,21	2,29	28,36	1,84	
							M0028	Areia média	m³	0,24214	0,37047	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	1,08343	35,21	2,29	38,15	2,48	
							M0005	Brita 0	m³	0,05765	0,08820	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,25795	35,21	2,29	9,08	0,59	
							M0191	Brita 1	m³	0,17820	0,27265	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,79734	35,21	2,29	28,07	1,83	
							M0344	Cal hidratada - a granel	kg	51,88000	0,05292	Caminhão silo com capacidade de 30 m³	0,19	265	31,290	50,00	60	0,14192	35,21	2,29	5,00	0,32	
							M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,05660	0,05773	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	299,47	60	0,93603	35,21	2,29	32,96	2,14	
							M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000	0,00816	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	50,00	60	0,02209	35,21	2,29	0,78	0,05	
M1103	Pedrisco	m³	0,11635	0,17802	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,52060	35,21	2,29	18,33	1,19								
4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m²	M1950	Emulsão asfáltica com polímero - RC-1C-E	t	0,00236	-	-	-	-	0,00236	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	229,58	60	0,02933	35,21	2,29	1,03	0,07	
			M0222	Filer calcário	kg	0,33750	-	-	-	-	0,00034	Caminhão carroceria com capacidade de 9 t	0,1	136	9,680	50,00	60	0,00079	35,21	2,29	0,03	0,00	
			6416036	Usinagem de agregados para microrrevestimento de 0,8 cm até 1,5 cml	m³	0,01500	-	-	-	-	-	0,02250	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	27,00	60	0,03553	35,21	2,29	1,25	0,08
							M0005	Brita 0	m³	0,20000	0,00450	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,01316	35,21	2,29	0,46	0,03	
M1135	Pó de pedra	m³	0,80000	0,01800	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,05264	35,21	2,29	1,85	0,12								

(continua)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Parâmetros transporte							Dados combustível		Resultados por CCU		
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Massa de material usado (t/un)	Equipamento transportador	Coef. consumo combustível (l/kWh)	Potência (kW)	Capacidade do equip. (t)	DMT (km)	Velocidade (km/h)	Consumo de combustível (l/UF)	EE _{com} (MJ/l)	FCO _{2com} (kgCO ₂ /l)	CE _{tra} (MJ/UF)	ECO _{2tra} (kgCO ₂ /UF)
4011353	Pintura de ligação	m ²	M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00045	-	-	-	-	0,00045	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	229,58	60	0,00559	35,21	2,29	0,20	0,01
4915661	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico - espessura de 3 cm	m ³	M3507	Revestimento asfáltico	m ³	1,00000	-	-	-	-	2,40000	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15,000	27,00	60	3,79008	35,21	2,29	133,45	8,68
4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	6416248	Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	1,02000	-	-	-	-	1,02000	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15,000	27,00	60	1,61078	35,21	2,29	56,72	3,69
							M0028	Areia média	m ³	0,37647	0,57600	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15,000	50,00	60	1,68448	35,21	2,29	59,31	3,86
							M0005	Brita 0	m ³	0,03137	0,04800	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,14036	35,21	2,29	4,94	0,32
							M0191	Brita 1	m ³	0,04706	0,07200	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,21057	35,21	2,29	7,41	0,48
							M0344	Cal hidratada - a granel	kg	70,58000	0,07199	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³	0,19	265	31,290	50,00	60	0,19307	35,21	2,29	6,80	0,44
							M1955	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	t	0,05882	0,06000	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	299,47	60	0,97275	35,21	2,29	34,25	2,23
							M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000	0,00816	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31,000	50,00	60	0,02209	35,21	2,29	0,78	0,05
M1103	Pedrisco	m ³	0,12549	0,19200	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15,000	50,00	60	0,56149	35,21	2,29	19,77	1,29							
4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua do revestimento asfáltico	m ³	M3507	Revestimento asfáltico	m ³	1,00000	-	-	-	-	2,40000	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9,000	25,00	60	3,02222	35,21	2,29	106,41	6,92
4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m ³	1,00000	-	-	-	-	2,30000	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,040	25,00	60	4,37335	35,21	2,29	153,99	10,01
							M0028	Areia média	m ³	0,37968	0,56952	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9,000	50,00	60	1,43435	35,21	2,29	50,50	3,28
							M0005	Brita 0	m ³	0,20688	0,31032	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9,000	50,00	60	0,78155	35,21	2,29	27,52	1,79
							M0191	Brita 1	m ³	0,45026	0,67539	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9,000	50,00	60	1,70098	35,21	2,29	59,89	3,90
							M0345	Cal hidratada - saco	kg	87,63000	0,08763	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	50,00	60	0,33325	35,21	2,29	11,73	0,76
							M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,18255	0,18255	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	2,26899	35,21	2,29	79,89	5,20
							M1103	Pedrisco	m ³	0,36509	0,54764	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9	50,00	60	1,37923	35,21	2,29	48,56	3,16
							M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00045	0,01500	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	0,18644	35,21	2,29	6,56	0,43
4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m ³	M2092	Emulsão asfáltica para imprimação	t	0,00520	-	-	-	-	0,00520	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	0,06463	35,21	2,29	2,28	0,15
			M3509	Material demolido - remendo profundo	m ³	1,00000	-	-	-	-	2,13040	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9	25,00	60	2,68273	35,21	2,29	94,46	6,14
			4915625	Solo melhorado com cimento para base de remendo profundo	m ³	0,80000	M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	kg	61,89000	0,04951	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	50,00	60	0,18829	35,21	2,29	6,63	0,43
			4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³	m ³	0,85381	-	-	-	-	1,60089	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9	25,00	60	2,01594	35,21	2,29	70,98	4,62
			-	-	-	-	-	-	0,46000	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	25,00	60	0,87467	35,21	2,29	30,80	2,00		
			4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m ³	0,20000	M0028	Areia média	m ³	0,37968	0,11390	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9	50,00	60	0,28687	35,21	2,29	10,10	0,66
			-	-	-	-	M0005	Brita 0	m ³	0,20688	0,06206	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9	50,00	60	0,15631	35,21	2,29	5,50	0,36
			-	-	-	-	M0191	Brita 1	m ³	0,45026	0,13508	Caminhão basculante de 6 m ³	0,1	136	9	50,00	60	0,34020	35,21	2,29	11,98	0,78

(continua)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Parâmetros transporte						Dados combustível		Resultados por CCU							
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Massa de material usado (t/un)	Equipamento transportador	Coef. consumo combustível (l/kWh)	Potência (kW)	Capacidade do equip. (t)	DMT (km)	Velocidade (km/h)	Consumo de combustível (l/UF)	EE _{com} (MJ/l)	FCO _{2com} (kgCO ₂ /l)	CE _{tra} (MJ/UF)	ECO _{2tra} (kgCO ₂ /UF)				
4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m³	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	0,20000	M0345	Cal hidratada - saco	kg	87,63000	0,01753	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	50,00	60	0,06665	35,21	2,29	2,35	0,15				
							M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,18255	0,03651	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	0,45380	35,21	2,29	15,98	1,04				
							M1103	Pedrisco	m³	0,36509	0,10953	Caminhão basculante de 6 m³	0,1	136	9	50,00	60	0,27585	35,21	2,29	9,71	0,63				
4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m³	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	1,00000	-	-	-	-	0,00900	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	0,11186	35,21	2,29	3,94	0,26				
							M1946	Emulsão asfáltica - RR-1C	t	0,00900	-	-	-	-	2,40000	Caminhão basculante de 6 m³	0,1	136	9	25,00	60	3,02222	35,21	2,29	106,41	6,92
							-	-	-	-	2,30000	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	25,00	60	4,37335	35,21	2,29	153,99	10,01				
							M0028	Areia média	m³	0,37968	0,56952	Caminhão basculante de 6 m³	0,1	136	9	50,00	60	1,43435	35,21	2,29	50,50	3,28				
							M0005	Brita 0	m³	0,20688	0,31032	Caminhão basculante de 6 m³	0,1	136	9	50,00	60	0,78155	35,21	2,29	27,52	1,79				
							M0191	Brita 1	m³	0,45026	0,67539	Caminhão basculante de 6 m³	0,1	136	9	50,00	60	1,70098	35,21	2,29	59,89	3,90				
							M0345	Cal hidratada - saco	kg	87,63000	0,08763	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	50,00	60	0,33325	35,21	2,29	11,73	0,76				
							M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,18255	0,18255	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	2,26899	35,21	2,29	79,89	5,20				
M1103	Pedrisco	m³	0,36509	0,54764	Caminhão basculante de 6 m³	0,1	136	9	50,00	60	1,37923	35,21	2,29	48,56	3,16											
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m³	6416092	Usinagem para sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m³	1,00000	M0005	Brita 0	m³	0,33486	2,40000	Caminhão basculante para concreto de 7 m³	0,14	188	15	9,00	40	1,89504	35,21	2,29	66,72	4,34				
							M0191	Brita 1	m³	0,31725	0,50229	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	1,46892	35,21	2,29	51,72	3,36				
							M0192	Brita 2	m³	0,22912	0,47588	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	1,39167	35,21	2,29	49,00	3,19				
							M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	100,00000	0,34368	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	1,00507	35,21	2,29	35,39	2,30				
							M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	100,00000	0,10000	Caminhão silo com capacidade de 30 m³	0,19	265	31,29	50,00	60	0,26819	35,21	2,29	9,44	0,61				
							M1135	Pó de pedra	m³	0,65211	0,97817	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	2,86059	35,21	2,29	100,72	6,55				
4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m²	M1947	Emulsão asfáltica - RM-1C	t	0,00115	-	-	-	-	0,00115	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	229,58	60	0,01429	35,21	2,29	0,50	0,03				
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m³	6416090	Usinagem para pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m³	1,00000	M0003	Aço CA 25	kg	4,68000	0,00468	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,01371	35,21	2,29	0,48	0,03				
							M0004	Aço CA 50	kg	1,25000	0,00125	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00366	35,21	2,29	0,13	0,01				
							M2152	Aditivo de cura para concreto	kg	1,00000	0,00100	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00293	35,21	2,29	0,10	0,01				
							M1377	Treliça nervurada eletrossoldada em aço CA 60	kg	2,20000	0,00220	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00644	35,21	2,29	0,23	0,01				
							-	-	-	-	2,40000	Caminhão basculante para concreto de 7 m³	0,14	188	15	9,00	40	1,89504	35,21	2,29	66,72	4,34				
							M0615	Aditivo incorporador de ar	kg	0,29000	0,00029	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00085	35,21	2,29	0,03	0,00				
							M0030	Aditivo plastificante e retardador de pega	kg	0,89000	0,00089	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00261	35,21	2,29	0,09	0,01				
							M0028	Areia média	m³	0,49730	0,74595	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	2,18149	35,21	2,29	76,81	5,00				
							M0191	Brita 1	m³	0,37750	0,56625	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	1,65597	35,21	2,29	58,31	3,79				
							M0192	Brita 2	m³	0,37750	0,56625	Caminhão basculante de 10 m³	0,14	188	15	50,00	60	1,65597	35,21	2,29	58,31	3,79				
M1954	Cimento Portland CP II - 32 - a granel	kg	350,00000	0,35000	Caminhão silo com capacidade de 30 m³	0,19	265	31,29	50,00	60	0,93867	35,21	2,29	33,05	2,15											

(conclusão)

CCU principal			Insumos da principal				Insumos da atividade auxiliar				Parâmetros transporte							Dados combustível		Resultados por CCU			
Código SICRO	Descrição	UF	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade	Massa de material usado (t/un)	Equipamento transportador	Coef. consumo combustível (l/kWh)	Potência (kW)	Capacidade do equip. (t)	DMT (km)	Velocidade (km/h)	Consumo de combustível (l/UF)	EE _{com} (MJ/l)	FCO _{2com} (kgCO ₂ /l)	CE _{tra} (MJ/UF)	ECO _{2tra} (kgCO ₂ /UF)	
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	M2150	Selante elástico à base de poliuretano e asfalto	kg	0,07920	-	-	-	-	0,00008	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00023	35,21	2,29	0,01	0,00	
4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	M1387	Adesivo estrutural à base de resina epóxi de média viscosidade	kg	9,56250	-	-	-	-	0,00956	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	50,00	60	0,03637	35,21	2,29	1,28	0,08	
			M0769	Lona plástica - E = 200 micra	m ²	5,00000	-	-	-	-	-	0,00030	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t	0,1	115	5,04	50,00	60	0,00114	35,21	2,29	0,04	0,00
			M0030	Aditivo plastificante e retardador de pega para concreto e argamassa	kg	1,05710	-	-	-	-	-	0,00106	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00310	35,21	2,29	0,11	0,01
			1107900	Concreto fck = 30 MPa - confecção em betoneira e lançamento manual - areia e brita comerciais	m ³	1,00000	M0082	Areia média lavada	m ³	0,59363	0,89045	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15	50,00	60	2,60406	35,21	2,29	91,69	5,96	
			M0191	Brita 1	m ³	0,36754	0,55131	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15	50,00	60	1,61228	35,21	2,29	56,77	3,69					
			M0192	Brita 2	m ³	0,36754	0,55131	Caminhão basculante de 10 m ³	0,14	188	15	50,00	60	1,61228	35,21	2,29	56,77	3,69					
			M0424	Cimento Portland CP II - 32 - saco	kg	352,36529	0,35237	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	1,03219	35,21	2,29	36,34	2,36					
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	M2150	Selante elástico à base de poliuretano e asfalto	kg	0,07920	-	-	-	-	0,00008	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t	0,14	188	14,975	50,00	60	0,00023	35,21	2,29	0,01	0,00	
4915695	Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm em pavimento de concreto com CAP	m	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	0,00025	-	-	-	-	0,00025	Caminhão tanque de asfalto de 31.000 l	0,19	265	31	299,47	60	0,00405	35,21	2,29	0,14	0,01	

Fonte: De autoria própria.

APÊNDICE C – Planilha de cálculo de CE_{exe} e ECO_{2exe} para todos as CCUs do exemplo de aplicação

(continua)

CCU principal				Insumos da principal					Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU						
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)				
4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	m ³	113,18	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	-	1,00000	0,34	-	-	-	-	-	35,72	Diesel	0,10731	35,21	2,29	3,78	0,25				
				E9514	Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido - 130 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	-	24,7	Diesel	0,21824	35,21	2,29	7,68	0,50		
				E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,65	-	-	-	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,06346	35,21	2,29	2,23	0,15		
				E9530	Rolo compactador liso vibratório autopropelido por pneus de 11 t - 97 kW	h	-	1,00000	0,52	-	-	-	-	-	-	-	15,52	Diesel	0,07131	35,21	2,29	2,51	0,16		
														E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m ³ - 195 kW	h	2,00000	0,57	15,6	Diesel	0,15713	35,21	2,29	5,53	0,36
														E9779	Grupo gerador - 113 kVA	h	1,00000	1,00	17,1	Diesel	0,15109	35,21	2,29	5,32	0,35
														E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - 0	h	6,60000	0,92	26,32	Diesel	0,29174	35,21	2,29	22,60	1,47
								6416040	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	113,18	1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 0	h	2,38842	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	4,16	0,27
														E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 1	h	0,66150	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,15	0,08
														E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 2	h	1,17270	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,04	0,13
										E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Pó de pedra	h	2,37731	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	4,14	0,27				
4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m ³	113,18	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	-	1,00000	0,34	-	-	-	-	-	35,72	Diesel	0,10731	35,21	2,29	3,78	0,25				
				E9514	Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido - 130 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	-	24,7	Diesel	0,21824	35,21	2,29	7,68	0,50		
				E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,65	-	-	-	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,06346	35,21	2,29	2,23	0,15		
				E9530	Rolo compactador liso vibratório autopropelido por pneus de 11 t - 97 kW	h	-	1,00000	0,52	-	-	-	-	-	-	-	15,52	Diesel	0,07131	35,21	2,29	2,51	0,16		
														E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m ³ - 195 kW	h	2,00000	0,55	15,6	Diesel	0,15162	35,21	2,29	5,34	0,35
														E9779	Grupo gerador - 113 kVA	h	1,00000	1,00	17,1	Diesel	0,15109	35,21	2,29	5,32	0,35
														E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - 0	h	6,60000	0,92	26,32	Diesel	0,29174	35,21	2,29	22,60	1,47
								6416042	Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita comercial em usina de 300 t/h	m ³	113,18	1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 0	h	3,13502	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	5,47	0,36
														E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 1	h	0,66002	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,15	0,07
														E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 2	h	0,32999	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,58	0,04

(continua)

CCU principal				Insumos da principal						Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU									
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)								
4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	m³	113,18	6416042	Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita comercial em usina de 300 t/h	m³	113,18	1,00000	-	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m³ - 265 kW - Cimento Portland CP II - 32 - a granel	h	0,08800	1,00	50,35	Diesel	1,92543	35,21	2,29	5,97	0,39								
								1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Pó de pedra	h	2,21099	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	3,85	0,25								
4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	99,6	6416143	Usinagem de concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	t	99,60	1,00000	0,71	-	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,07877	35,21	2,29	2,77	0,18								
								E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
								E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	h	-	1,00000	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	22,14	Diesel	0,18228	35,21	2,29	6,42	0,42	
								E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	15,58	Diesel	0,15643	35,21	2,29	5,51	0,36	
																1,02000	0,00	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h	1,00000	1,00	1,8	Diesel	0,01843	35,21	2,29	0,65	0,04
																1,02000	0,00	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	h	1,00000	0,81	9,04	Diesel	0,07499	35,21	2,29	2,64	0,17
																1,02000	0,00	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,00000	1,00	69,35	Diesel	0,71021	35,21	2,29	25,01	1,63
																1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - 0	h	3,06000	0,81	26,32	Diesel	0,64214	35,21	2,29	23,06	1,50
																1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Areia média	h	1,11142	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,94	0,13
																1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 0	h	0,26461	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,46	0,03
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 1	h	0,81794	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,43	0,09								
								1,02000	-	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m³ - 265 kW - Cal hidratada - a granel	h	0,05292	1,00	50,35	Diesel	1,92543	35,21	2,29	3,59	0,23								
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Pedrisco	h	0,53405	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,93	0,06								
4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	99,6	6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	99,60	1,00000	0,71	-	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,07877	35,21	2,29	2,77	0,18								
								E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
								E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	h	-	1,00000	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	22,14	Diesel	0,18228	35,21	2,29	6,42	0,42	
								E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	15,58	Diesel	0,15643	35,21	2,29	5,51	0,36	
																1,02000	0,00	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h	1,00000	1,00	1,8	Diesel	0,01843	35,21	2,29	0,65	0,04
																1,02000	0,00	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	h	1,00000	0,80	9,04	Diesel	0,07406	35,21	2,29	2,61	0,17
																1,02000	0,00	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,00000	1,00	69,35	Diesel	0,71021	35,21	2,29	25,01	1,63
																1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - 0	h	3,06000	0,81	26,32	Diesel	0,64214	35,21	2,29	23,06	1,50
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Areia média	h	1,49060	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,60	0,17								

(continua)

CCU principal				Insumos da principal						Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU						
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)					
4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	99,6	6416078	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t	99,60	1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 0	h	0,28665	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,50	0,03					
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 1	h	0,28665	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,50	0,03					
								1,02000	-	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m³ - 265 kW - Cal hidratada - a granel	h	0,05732	1,00	50,35	Diesel	1,92543	35,21	2,29	3,89	0,25					
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Pedrisco	h	0,63062	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,10	0,07					
4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	99,6	6416248	Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t	99,60	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,71	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,07877	35,21	2,29	2,77	0,18		
								E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	h	-	1,00000	0,82	-	-	-	-	-	-	22,14	Diesel	0,18228	35,21	2,29	6,42	0,42
								E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	15,58	Diesel	0,15643	35,21	2,29	5,51	0,36
								1,02000	0,00	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h	1,00000	1,00	1,8	Diesel	0,01843	35,21	2,29	0,65	0,04					
								1,02000	0,00	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	h	1,00000	0,79	9,04	Diesel	0,07314	35,21	2,29	2,58	0,17					
								1,02000	0,00	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,00000	1,00	69,35	Diesel	0,71021	35,21	2,29	25,01	1,63					
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - 0	h	3,06000	0,81	26,32	Diesel	0,64214	35,21	2,29	23,06	1,50					
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Areia média	h	1,72800	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	3,01	0,20					
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 0	h	0,14399	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,25	0,02					
								1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 1	h	0,21601	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,38	0,02					
1,02000	-	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m³ - 265 kW - Cal hidratada - a granel	h	0,07199	1,00	50,35	Diesel	1,92543	35,21	2,29	4,88	0,32													
1,02000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Pedrisco	h	0,57600	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,00	0,07													
4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m³	2,25	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	2,48	E9682	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 1,6 t - 18 kW	h	-	1,00000	0,17	-	-	-	4,86	Diesel	0,36720	35,21	2,29	12,93	0,84			
								4011353	Pintura de ligação	m²	1500,00	33,33333	0,00	E9519	Betoneira com motor a gasolina com capacidade de 600 l - 10 kW	h	1,00000	1,00	3,5	Gasolina	1,40972	35,21	2,29	41,77	2,30	
								4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	2,48	1,00000	-	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	h	1,00000	1,00	27,24	Diesel	0,60533	35,21	2,29	21,31	1,39	
								4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m³	2,48	1,00000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - 0	h	2,30000	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	120,00	7,80	

(continua)

CCU principal				Insumos da principal						Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU	
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)
4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	2,25	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m ³	2,48	1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Areia média	h	1,70856	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	2,55	0,17
								1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Brita 0	h	0,93096	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	1,39	0,09
								1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Brita 1	h	2,02617	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	3,02	0,20
								1,00000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - Cal hidratada - saco	h	0,08763	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	4,57	0,30
								1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Pedrisco	h	1,64291	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	2,45	0,16
4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua do revestimento asfáltico	m ³	13,14	E9605	Caminhão tanque com capacidade de 6.000 l - 136 kW	h	-	1,00000	0,08	-	-	-	-	-	25,84	Diesel	0,15732	35,21	2,29	5,54	0,36
				E9700	Fresadora a frio - 155 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	27,9	Diesel	2,12329	35,21	2,29	74,76	4,86	
				E9697	Minicarregadeira de pneus com vassoura de 1,8 m - 45,50 kW	h	-	1,00000	0,27	-	-	-	-	11,375	Diesel	0,23373	35,21	2,29	8,23	0,54	
				E9156	Soprador de ar costal - 2,6 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	0,91	Gasolina	0,06925	35,21	2,29	2,05	0,11	
				M3507	Revestimento asfáltico	m ³	-	1,00000	-	-	-	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - 0	h	4,80000	0,69	13,6	Diesel	0,59505	35,21
4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	m ²	1623,91	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	27,24	Diesel	0,01677	35,21	2,29	0,59	0,04
4915661	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico - espessura de 3 cm	m ³	34,69	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	-	1,00000	0,18	-	-	-	-	-	35,72	Diesel	0,18534	35,21	2,29	6,53	0,42
				E9678	Fresadora a frio - 455 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	73,8	Diesel	2,12741	35,21	2,29	74,91	4,87	
				E9697	Minicarregadeira de pneus com vassoura de 1,68 m - 45,50 kW	h	-	2,00000	0,57	-	-	-	-	11,375	Diesel	0,37381	35,21	2,29	13,16	0,86	
				E9156	Soprador de ar costal - 2,6 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	0,91	Gasolina	0,02623	35,21	2,29	0,78	0,04	
				M3507	Revestimento asfáltico	m ³	-	1,00000	-	-	-	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - 0	h	4,80000	0,75	26,32	Diesel	0,47418	35,21
4915714	Limpeza e enchimento com resina epóxi de fissuras niveladas com abertura máxima de 0,4 mm e profundidade de 20 mm em pavimento de concreto que não atravessam toda a espessura da placa	m	82,5	E9767	Compressor de ar portátil de 9,44 l/s (20 PCM) a gasolina - 5,22 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	1,827	Gasolina	0,02215	35,21	2,29	0,66	0,04
4915695	Limpeza, serragem e enchimento de fissuras niveladas com abertura entre 0,4 mm e 1,0 mm e profundidade de 25 mm em pavimento de concreto com CAP	m	37,58	E9522	Caldeira de asfalto rebocável com capacidade de 1.500 l - 6,5 kW	h	-	1,00000	0,07	-	-	-	-	-	0,91	Diesel	0,00170	35,21	2,29	0,06	0,00
				E9767	Compressor de ar portátil de 9,44 l/s (20 PCM) a gasolina - 5,22 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	1,827	Gasolina	0,04862	35,21	2,29	1,44	0,08	
				E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	3,5	Gasolina	0,09313	35,21	2,29	2,76	0,15	
4011410	Micronevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m ²	664	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	-	1,00000	0,13	-	-	-	-	-	35,72	Diesel	0,00699	35,21	2,29	0,25	0,02
				E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	h	-	1,00000	0,06	-	-	-	-	9,04	Diesel	0,00082	35,21	2,29	0,03	0,00	

(continua)

CCU principal				Insumos da principal						Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU				
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)			
4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero de 1,5 cm - brita comercial	m ²	664	E9670	Usina móvel de lama asfáltica ou microrrevestimento com cavalo mecânico com capacidade de 12 m ³ - 95,6 kW/240 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	64,72	Diesel	0,09747	35,21	2,29	3,43	0,22			
				M0222	Filer calcário	kg	-	0,33750	-	0,01500	0,00	E9508	Caminhão carroceria com capacidade de 9 t - 136 kW - 0	h	0,00034	1,00	13,6	Diesel	1,20035	35,21	2,29	0,01	0,00	
											0,01500	0,00	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	h	1,00000	0,45	9,04	Diesel	0,00184	35,21	2,29	0,06	0,00
											0,01500	0,00	E9754	Grupo gerador - 68 kVA	h	1,00000	1,00	10,26	Diesel	0,00464	35,21	2,29	0,16	0,01
				6416036	Usinagem de agregados para microrrevestimento a frio com espessura de 0,8 cm até 1,5 cm - brita comercial	m ³	33,20	0,01500	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - 0	h	0,04500	0,69	26,32	Diesel	0,72935	35,21	2,29	0,58	0,04			
											0,01500	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 0	h	0,01350	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,02	0,00
											0,01500	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Pó de pedra	h	0,05400	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	0,09	0,01
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m ³	124,5	E9589	Máquina texturizadora e aplicadora de cura química em pavimento de concreto - 44,80 kW	h	-	1,00000	0,72	-	-	-	-	-	6,72	Diesel	0,03886	35,21	2,29	1,37	0,09			
				E9588	Vibroacabadora de concreto sobre esteiras com fôrmas deslizantes - 205 kW	h	-	1,00000	0,83	-	-	-	-	-	-	-	38,95	Diesel	0,25967	35,21	2,29	9,14	0,59	
				M0003	Aço CA 25	kg	-	4,68000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - 0	h	0,00468	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,37	0,02			
				M0004	Aço CA 50	kg	-	1,25000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - 0	h	0,00125	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,10	0,01			
				M2152	Aditivo de cura para concreto	kg	-	1,00000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - 0	h	0,00100	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,08	0,01			
				M1377	Treliça nervurada eletrossoldada em aço CA 60	kg	-	2,20000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - 0	h	0,00220	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,17	0,01			
											1,00000	0,00	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m ³ - 195 kW	h	2,00000	0,54	15,6	Diesel	0,13533	35,21	2,29	4,76	0,31
											1,00000	0,00	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,00000	1,00	69,35	Diesel	0,55703	35,21	2,29	19,61	1,28
											1,00000	-	E9145	Caminhão basculante para concreto com capacidade de 7 m ³ - 188 kW - 0	h	9,60000	0,76	26,32	Diesel	0,26778	35,21	2,29	22,63	1,47
				6416090	Usinagem para pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m ³	124,50	1,00000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - Aditivo incorporador de ar para concreto e argamassa	h	0,00029	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,02	0,00			
							1,00000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - Aditivo plastificante e retardador de pega para concreto e argamassa	h	0,00089	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,07	0,00				
							1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Areia média	h	2,23785	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	3,90	0,25				
							1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 1	h	1,69875	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,96	0,19				

(continua)

CCU principal				Insumos da principal						Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU				
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)			
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m³	124,5	6416090	Usinagem para pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m³	124,50	1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 2	h	1,69875	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,96	0,19			
								1,00000	-	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m³ - 265 kW - Cimento Portland CP II - 32 - a granel	h	0,35000	1,00	50,35	Diesel	1,92543	35,21	2,29	23,73	1,54			
4011353	Pintura de ligação	m²	1500	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	27,24	Diesel	0,01816	35,21	2,29	0,64	0,04			
								1,00000	1,00	-	-	-	-	-	27,24	Diesel	0,01816	35,21	2,29	0,64	0,04			
4011209	Regularização do subleito	m²	1121,33	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	-	2,00000	0,51	-	-	-	-	-	35,72	Diesel	0,03249	35,21	2,29	1,14	0,07			
				E9524	Motoniveladora - 93 kW	h	-	1,00000	0,71	-	-	-	-	-	-	-	13,95	Diesel	0,00883	35,21	2,29	0,31	0,02	
				E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,96	-	-	-	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,00946	35,21	2,29	0,33	0,02	
				E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	-	13,12	Diesel	0,01170	35,21	2,29	0,41	0,03	
				E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	h	-	1,00000	0,69	-	-	-	-	-	-	-	13,86	Diesel	0,00853	35,21	2,29	0,30	0,02	
				E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	-	2,00000	0,51	-	-	-	-	-	-	-	-	35,72	Diesel	0,03249	35,21	2,29	1,14	0,07
				E9524	Motoniveladora - 93 kW	h	-	1,00000	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	13,95	Diesel	0,00883	35,21	2,29	0,31	0,02
				E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,96	-	-	-	-	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,00946	35,21	2,29	0,33	0,02
				E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	13,12	Diesel	0,01170	35,21	2,29	0,41	0,03
E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	h	-	1,00000	0,69	-	-	-	-	-	-	-	-	13,86	Diesel	0,00853	35,21	2,29	0,30	0,02				
4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m³	1	E9155	Caldeira de asfalto rebocável com capacidade de 600 l - 5,20 kW	h	-	1,00000	0,01	-	-	-	-	-	0,728	Diesel	0,00728	35,21	2,29	0,26	0,02			
				E9647	Compactador manual com soquete vibratório - 4,10 kW	h	-	1,00000	0,28	-	-	-	-	-	-	-	1,435	Gasolina	0,40180	35,21	2,29	11,91	0,65	
				E9556	Compactador manual de placa vibratória - 3,00 kW	h	-	1,00000	0,09	-	-	-	-	-	-	-	1,05	Gasolina	0,09450	35,21	2,29	2,80	0,15	
				E9646	Compressor de ar portátil de 58,52 l/s (124 PCM) - 27 kW	h	-	1,00000	0,19	-	-	-	-	-	-	-	4,59	Diesel	0,87210	35,21	2,29	30,71	2,00	
				E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	h	-	1,00000	0,12	-	-	-	-	-	-	-	3,5	Gasolina	0,42000	35,21	2,29	12,44	0,68	
				4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	230,19	0,85381	0,00	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m³ - 118 kW	h	1,00000	1,00	15,34	Diesel	0,05690	35,21	2,29	2,00	0,13			
				M3509	Material demolido - remendo profundo	m³	-	1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m³ - 136 kW - 0	h	2,13040	1,00	13,6	Diesel	1,43343	35,21	2,29	107,52	6,99			
				4915625	Solo melhorado com cimento para base de remendo profundo	m³	1,00	0,80000	-	E9687	Caminhão carrocera com capacidade de 5 t - 115 kW - Cimento Portland CP II - 32 - saco	h	0,04951	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	2,58	0,17			
4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³	m³	230,19	0,85381	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m³ - 136 kW - 0	h	6,40356	0,79	13,6	Diesel	0,09957	35,21	2,29	5,61	0,37							

(continua)

CCU principal				Insumos da principal						Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU				
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)			
4915631	Remendo profundo com imprimação com emulsão asfáltica - demolição mecânica e corte com serra	m ³	1	4916290	Mistura betuminosa a frio executada em betoneira - faixa C - areia e brita comerciais	m ³	2,48	0,20000	0,00	E9519	Betoneira com motor a gasolina com capacidade de 600 l - 10 kW	h	1,00000	1,00	3,5	Gasolina	0,28194	35,21	2,29	8,35	0,46			
								0,20000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - 0	h	0,46000	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	24,00	1,56			
								0,20000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Areia média	h	0,34171	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	0,51	0,03			
								0,20000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Brita 0	h	0,18619	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	0,28	0,02			
								0,20000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Brita 1	h	0,40523	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	0,60	0,04			
								0,20000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - Cal hidratada - saco	h	0,01753	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	0,91	0,06			
								0,20000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Pedrisco	h	0,32858	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	0,49	0,03			
4915632	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e corte com serra	m ³	1	E9155	Caldeira de asfalto rebocável com capacidade de 600 l - 5,20 kW	h	-	1,00000	0,03	-	-	-	-	-	0,728	Diesel	0,02184	35,21	2,29	0,77	0,05			
				E9556	Compactador manual de placa vibratória - 3,00 kW	h	-	1,00000	0,46	-	-	-	-	-	-	-	1,05	Gasolina	0,48300	35,21	2,29	14,31	0,79	
				E9646	Compressor de ar portátil de 58,52 l/s (124 PCM) - 27 kW	h	-	1,00000	0,97	-	-	-	-	-	-	-	4,59	Diesel	4,45230	35,21	2,29	156,77	10,20	
				E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	h	-	1,00000	0,59	-	-	-	-	-	-	-	3,5	Gasolina	2,06500	35,21	2,29	61,19	3,37	
				M3507	Revestimento asfáltico	m ³	-	1,00000	-	-	-	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - 0	h	2,40000	1,00	13,6	Diesel	1,73323	35,21	2,29	146,46	9,53
				1,00000	0,00	E9519	Betoneira com motor a gasolina com capacidade de 600 l - 10 kW	h	1,00000	1,00	3,5	Gasolina	1,40972	35,21	2,29	41,77	2,30							
				1,00000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - 0	h	2,30000	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	120,00	7,80							
				1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Areia média	h	1,70856	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	2,55	0,17							
				1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Brita 0	h	0,93096	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	1,39	0,09							
				1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Brita 1	h	2,02617	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	3,02	0,20							
1,00000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - Cal hidratada - saco	h	0,08763	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	4,57	0,30											
1,00000	-	E9506	Caminhão basculante com capacidade de 6 m ³ - 136 kW - Pedrisco	h	1,64291	0,72	13,6	Diesel	0,12702	35,21	2,29	2,45	0,16											
4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	0,73894	E9640	Compressor de ar portátil de 33,51 l/s (71 PCM) - 14 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	2,38	Diesel	3,22083	35,21	2,29	113,41	7,38			
				E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	h	-	1,00000	0,18	-	-	-	-	-	-	3,5	Gasolina	0,85257	35,21	2,29	25,26	1,39		
				E9156	Soprador de ar costal - 2,6 kW	h	-	1,00000	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0,91	Gasolina	0,01231	35,21	2,29	0,36	0,02	

(continua)

CCU principal				Insumos da principal					Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU			
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)	
4915753	Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m³	0,73894	1100657	Adensamento de concreto por vibrador de imersão	m³	9,00	1,00000	0,00	E9069	Vibrador de imersão para concreto - 4,10 kW	h	1,00000	1,00	1,435	Gasolina	0,15944	35,21	2,29	4,72	0,26	
				M1387	Adesivo estrutural à base de resina epóxi de média viscosidade	kg	-	9,56250	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - 0	h	0,00956	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	0,50	0,03	
				M0769	Lona plástica - E = 200 micra	m²	-	5,00000	-	E9687	Caminhão carroceria com capacidade de 5 t - 115 kW - 0	h	0,00030	1,00	11,5	Diesel	1,48176	35,21	2,29	0,02	0,00	
								1,00000	0,00	E9519	Betoneira com motor a gasolina com capacidade de 600 l - 10 kW	h	1,00000	1,00	3,5	Gasolina	0,90838	35,21	2,29	26,92	1,48	
								1,00000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - Aditivo plastificante e retardador de pega para concreto e argamassa	h	0,00106	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,08	0,01	
								1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Areia média lavada	h	2,67134	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	4,66	0,30	
								1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 1	h	1,65393	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,88	0,19	
				1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 2	h	1,65393	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,88	0,19					
				1,00000	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - Cimento Portland CP II - 32 - saco	h	0,35237	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	27,58	1,79					
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m	41,5	E9605	Caminhão tanque com capacidade de 6.000 l - 136 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	25,84	Diesel	0,62265	35,21	2,29	21,92	1,43	
				E9646	Compressor de ar portátil de 58,52 l/s (124 PCM) - 27 kW	h	-	1,00000	0,10	-	-	-	-	-	-	4,59	Diesel	0,01106	35,21	2,29	0,39	0,03
				E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	3,5	Gasolina	0,08434	35,21	2,29	2,50	0,14
				E9605	Caminhão tanque com capacidade de 6.000 l - 136 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	25,84	Diesel	0,62265	35,21	2,29	21,92	1,43
				E9646	Compressor de ar portátil de 58,52 l/s (124 PCM) - 27 kW	h	-	1,00000	0,10	-	-	-	-	-	-	4,59	Diesel	0,01106	35,21	2,29	0,39	0,03
				E9591	Serra para corte de concreto e asfalto - 10 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	3,5	Gasolina	0,08434	35,21	2,29	2,50	0,14
				M2150	Selante elástico à base de poliuretano e asfalto	kg	-	0,07920	-	E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW - 0	h	0,00008	1,00	26,32	Diesel	2,22297	35,21	2,29	0,01	0,00	
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m³	124,5	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	h	-	1,00000	0,61	-	-	-	-	-	22,14	Diesel	0,10848	35,21	2,29	3,82	0,25	
				E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	-	15,58	Diesel	0,12514	35,21	2,29	4,41	0,29
								1,00000	0,00	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kW	h	2,00000	0,66	15,6	Diesel	0,16540	35,21	2,29	5,82	0,38	
								1,00000	0,00	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	1,00000	1,00	69,35	Diesel	0,55703	35,21	2,29	19,61	1,28	
								1,00000	-	E9145	Caminhão basculante para concreto com capacidade de 7 m³ - 188 kW - 0	h	9,60000	0,76	26,32	Diesel	0,26778	35,21	2,29	22,63	1,47	
				1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW - Brita 0	h	1,50687	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,63	0,17					

(conclusão)

CCU principal				Insumos da principal					Insumos da atividade auxiliar					Dados do equipamento		Parâmetros			Resultados por CCU		
Código SICRO	Descrição	UF	Produção de equipe (UF/h)	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Produção de equipe da auxiliar	Quantidade na principal	Utilização operativa	Código insumo	Descrição insumo	Unidade insumo	Quantidade na auxiliar	Utilização operativa	Consumo de combustível (l/h)	Tipo de combust.	Consumo de combustível (l/UF)	Energia embutida (MJ/l)	Fator de emissão (kgCO ₂ /l)	Consumo energético (MJ/UF)	Emissão de CO ₂ (kgCO ₂ /UF)
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m ³	124,5	6416092	Usinagem para sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m ³	124,50	1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 1	h	1,42763	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	2,49	0,16
								1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Brita 2	h	1,03104	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	1,80	0,12
								1,00000	-	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW - Cimento Portland CP II - 32 - a granel	h	0,10000	1,00	50,35	Diesel	1,92543	35,21	2,29	6,78	0,44
								1,00000	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - Pó de pedra	h	2,93450	0,86	26,32	Diesel	0,14854	35,21	2,29	5,12	0,33
4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	m ²	906,04	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	h	-	1,00000	1,00	-	-	-	-	-	27,24	Diesel	0,03006	35,21	2,29	1,06	0,07
				E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	-	1,00000	0,26	-	-	-	-	11,05	Diesel	0,00317	35,21	2,29	0,11	0,01	
				M0005	Brita 0	m ³	-	0,00667	-	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW - 0	h	0,12006	0,97	26,32	Diesel	0,67015	35,21	2,29	0,24	0,02

Fonte: De autoria própria.

