

Método para cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂ dos serviços de infraestrutura de transportes do SICRO: análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland

Method for calculating energy consumption and CO₂ emission of SICRO's transport infrastructure services: a comparative analysis between asphalt and Portland cement concrete pavements

Alice Amorim Teles¹, Leandro Modesto Prates Beltrão¹, Isaias Agricola Silva Gonçalves Filho¹, Michele Tereza Marques Carvalho¹

¹Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil

Contato: alice.a.teles@gmail.com,  (AAT); leandromodesto.eng@gmail.com,  (LMPB); isaiasgf@gmail.com,  (IASGF); micheletezeza@unb.br,  (MTMC)

Recebido:

6 de junho de 2022

Revisado:

28 de março de 2024

Aceito para publicação:

1 de abril de 2024

Publicado:

14 de maio de 2024

Editor de Área:

Jorge Barbosa Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Palavras-chave:

Avaliação do ciclo de vida.
Emissão de CO₂.
Consumo energético.
Infraestrutura de transportes.

Keywords:

Life cycle analysis.
CO₂ emission.
Energy consumption.
Transport infrastructure.

DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2791

RESUMO

A aplicação de ferramentas que possibilitem uma avaliação quantitativa dos impactos no meio ambiente oriundos dos projetos de infraestrutura é uma demanda global na busca da sustentabilidade. No contexto brasileiro, esse tipo de avaliação ainda não se apresenta como prática consolidada nos estudos de projetos de infraestrutura de transportes. Diante disso, este artigo visa apresentar um método inteligível e eficaz para cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂ em serviços de infraestrutura, com base em dados referenciais do SICRO, de forma a impulsionar esse tipo de avaliação em empreendimentos de construção pesada. Para testar sua validade, o método é aplicado para comparar serviços de dois tipos de pavimentos, o asfáltico e o de concreto de cimento Portland. Os valores obtidos por quilômetro por ano apontam um consumo energético 4,8 vezes maior para a solução-tipo asfáltica em relação ao pavimento de concreto. No que diz respeito à massa de CO₂ emitida, a solução de concreto apresentou uma contribuição 51% inferior à asfáltica. 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.

ABSTRACT

The application of tools that enable a quantitative assessment of the environmental impact of infrastructure projects is a global demand in the pursuit of sustainability. In the Brazilian context, this type of evaluation is not yet a consolidated practice in studies of transport infrastructure projects. Therefore, this article aims to present an intelligible and effective method for calculating energy consumption and CO₂ emissions in infrastructure services, based on reference data from SICRO, in order to boost this type of evaluation in heavy construction projects. To test its validity, the method is applied to compare two types of pavements, asphalt and Portland cement concrete. The values obtained per kilometer per year indicate an energy consumption 4.8 times higher for the asphalt-type solution compared to the concrete pavement. Regarding the CO₂ emission mass, the concrete solution showed a 51% lower contribution than the asphalt one. This research is configured as a relevant



contribution to decision-making between different constructive solutions by quantifying in an accessible way parameters of environmental impact from nationally disseminated data and which already integrate transport infrastructure projects, such as those of SICRO, in addition to add new utility to the cost compositions of this system.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolvimento da infraestrutura de transportes no Brasil é acompanhada pela crescente exigência de atendimento a conceitos atrelados à sustentabilidade. Segundo o ranking do Fórum Econômico Mundial, o país ocupava apenas a 78ª posição em termos de competitividade relacionada à infraestrutura no ano de 2019 (WEF, 2019). Já a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017) aponta que somente 12% das rodovias brasileiras são pavimentadas e, de 30.000 quilômetros de trilhos ferroviários, um terço está em situação de abandono.

Em pesquisa realizada em 2021 pela CNT, foram identificados padrões preocupantes quanto ao estado atual da infraestrutura de transporte brasileira. O nível de investimento, desde 2016 até 2020, tem registrado queda mesmo diante de um cenário em que 71,8% das rodovias administradas pelo Estado são avaliadas como Regular, Ruim ou Péssima. O custo de acidentes estimado é de R\$ 8,85 bilhões, superior ao valor investido nesse setor, e o consumo a mais de combustível, devido a problemas nas rodovias, resultou em volume estimado de 955,99 milhões de litros de diesel, gerando o equivalente a 2,53 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (CNT/SEST/SENAT, 2021).

Para que ocorra um desenvolvimento sustentável, é mister que a responsabilidade ambiental possa se amparar em políticas públicas com potencial de fomentar o setor. Todavia, ainda não há uma sistemática de quantificação dos impactos referentes ao ciclo de vida de projetos de construção em âmbito nacional. Segundo Savietto (2017), em países europeus como Suíça, Portugal e França, já é obrigatória a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ainda nas fases preliminares para embasar o processo de tomada de decisão quanto ao melhor tipo de pavimentação.

A ACV é uma ferramenta de alcance abrangente e sistemática na avaliação ambiental, possibilitando a análise das diferentes etapas do ciclo de vida de um produto e auxiliando na compreensão dos impactos gerados de forma quantitativa (Di Domênico, Silva e Ribeiro, 2021). A aplicação dessa ferramenta de forma completa, ou seja, considerando todos os possíveis indicadores e serviços, é muito complexa em virtude da falta de dados e da quantidade de serviços/materiais na construção civil. Sob essa ótica, a Avaliação do Ciclo de Vida Modular (ACV-m) consiste em uma análise mais simplificada do ciclo de vida capaz de caracterizar de maneira adequada o impacto ambiental mesmo com um escopo reduzido (Paulsen e Sposto, 2013).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é apresentar um método para viabilizar a ACV-m dos serviços de infraestrutura de transportes constantes do Sistema de Custos Referenciais de Obra (SICRO), considerando o consumo energético (CE) e a emissão de CO₂ (ECO₂). Para testar sua validade, o método é aplicado em duas soluções construtivas de pavimentação: pavimento asfáltico e pavimento de concreto de cimento Portland.

O presente trabalho insere-se na vanguarda de discussões acerca de métodos formais para o cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂ para serviços de infraestrutura de transportes, a partir de parâmetros do SICRO. O método elucidado confere nova aplicabilidade às composições de custos unitários do sistema, as quais também passam a servir de referência para avaliações ambientais do CE e da ECO₂. Portanto, o artigo tem a intenção de contribuir com o conhecimento científico nacional, auxiliando a incorporação de aspectos de sustentabilidade em tomadas de decisão dos mais variados projetos de infraestrutura de transportes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ACV-m

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 (CBCS, 2014). Esses impactos ambientais são estudados ao longo da vida de um produto (“berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição (ISO). De acordo com Di Domênico, Silva e Ribeiro (2021), em relação à construção, a ACV pode ser utilizada para comparar diferentes materiais usados durante o ciclo de vida de uma estrutura, de forma a identificar de onde se originam as maiores contribuições para tais impactos. Já autores como Zhou et al. (2022) utilizam da ACV para comparar projetos de infraestrutura concebidos com diferentes soluções construtivas sob a luz de parâmetros relacionados a impactos ambientais.

A escassez, ou mesmo ausência, de bancos de dados robusto é um dos principais limitadores na aplicação da ACV na construção, conforme indicado por Di Domênico, Silva e Ribeiro (2021), Machado (2020) e Paulsen e Sposto (2013). Como uma forma de evolução dessa ferramenta, foi introduzido o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida Modular, que possui escopo reduzido em que apenas os impactos ambientais mais significativos são listados (CBCS, 2014). Essa análise contém parâmetros referentes a: emissões de CO₂, consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos e uso de matérias primas (CBCS, 2014). Segundo Oliveira (2015), a ACV-m é uma avaliação do ciclo de vida simplificada, realizada pela redução da abrangência e uso de dados secundários, estes últimos referentes à energia incorporada e aos fatores de emissão dos insumos.

2.2. Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)

O SICRO foi desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para referenciar todo o conhecimento técnico necessário à elaboração de orçamentos de obras e serviços no âmbito dessa Autarquia. Ao longo dos anos, foram realizados diversos aprimoramentos que permitiram ampliar a aplicabilidade desse sistema, possibilitando a execução de orçamentos mais precisos e tecnicamente viáveis.

O SICRO, estabelecido tanto pelo Decreto nº 7.983, de 08 de abril de 2013 (Brasil, 2013), quanto pela Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021 (Brasil, 2021), como fonte referencial para obtenção do custo global de referência dos serviços e obras de infraestrutura de transportes em editais públicos de licitação, consiste em um sistema referencial de custos que dispõe de composições de custos unitários (CCUs). A CCU, por sua vez, define qualitativa e quantitativamente os insumos necessários à realização de determinado serviço (DNIT, 2017), sendo composta por seis parcelas: A - Equipamentos, B - Mão de obra, C - Materiais, D - Atividades auxiliares, E - Tempo fixo e F - Momento de transporte.

3. MÉTODO

A ACV-m proposta no método deste estudo visa calcular o consumo energético e a emissão de CO₂ dos serviços de infraestrutura de transportes contemplados no SICRO, considerando as seguintes fases do ciclo de vida destacadas na Figura 1.

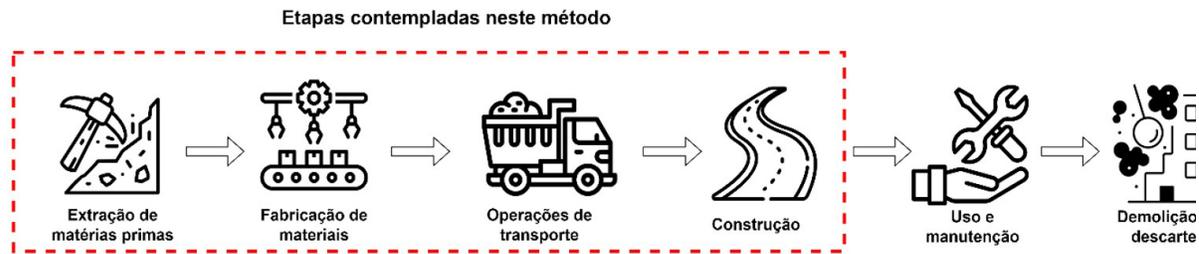


Figura 1. Fases do ciclo de vida.

As etapas contempladas são divididas neste método da seguinte forma:

- 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 do serviço;
- Atividades executivas dos equipamentos: retratam a atuação das patrulhas mecânicas utilizadas no serviço.

A ACV-m proposta neste método não considera o consumo energético e a emissão de CO_2 associados à mão de obra, pois seu cálculo envolve fatores de difícil modelagem a partir somente das composições de custos unitários, como refeições e transportes diários. Tampouco se contabiliza a fabricação dos equipamentos, haja vista que um mesmo equipamento é comumente utilizado em mais de um serviço e em empreendimentos distintos. Isso fraciona consideravelmente o consumo energético e a emissão de CO_2 decorrentes da manufatura dos equipamentos, dificultando, assim, a mensuração desses componentes da ACV-m.

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

A Unidade Funcional (UF) da ACV-m consiste na própria unidade de medida das composições de custos unitários dos serviços constantes do SICRO.

Definido o escopo da ACV-m, bem como sua UF, o cálculo do consumo energético e da emissão de CO_2 proposto neste método se desenvolve consoante as etapas ilustradas no fluxo da Figura 2.

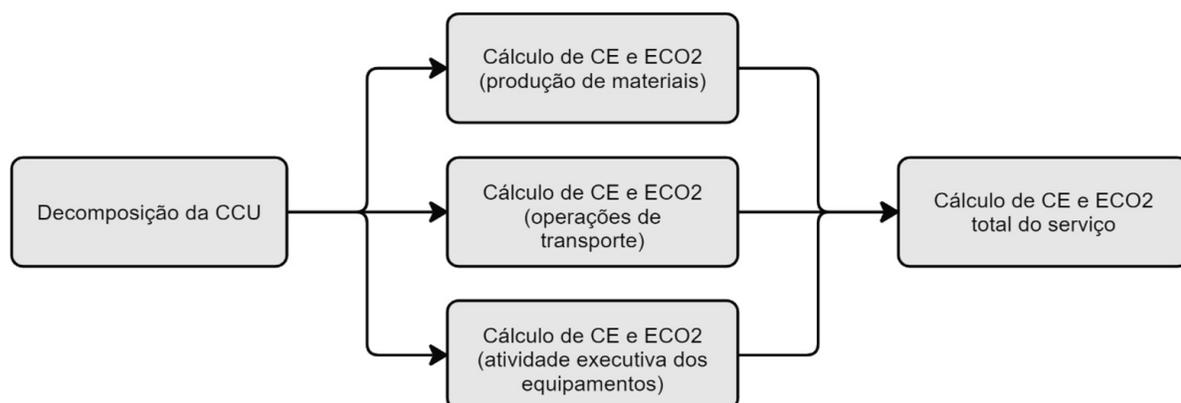


Figura 2. Etapas do método.

Vale salientar que as equações apresentadas neste trabalho para quantificação do consumo energético e emissão de CO₂ foram desenvolvidas pelos autores sob a luz dos conceitos da análise de inventário estabelecidos por meio da ISO 14040:2006 de avaliação do ciclo de vida [adaptado de: ISO, 2006].

3.1. 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. Após a decomposição das atividades auxiliares, gera-se uma lista descrevendo equipamentos, materiais, tempo fixo e momento de transporte resultantes.

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 3 exemplifica os procedimentos descritos para a decomposição da CCU.

Cabe destacar que, para fins deste método, os cálculos das etapas subsequentes são efetuados com base na lista pós-decomposição da CCU do serviço.

3.2. Cálculo de CE e ECO₂ na 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.

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

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

em que CE_{pro} consumo energético do serviço na produção dos materiais [M]/UF]; EE_{pro} energia embutida na produção do material [M]/t]; m massa do material no serviço [t/UF]; $ECO_{2,pro}$ emissão de CO_2 do serviço na produção dos materiais [kg CO_2 /UF]; $FCO_{2,pro}$ fator de emissão de CO_2 na produção do material [kg CO_2 /t].

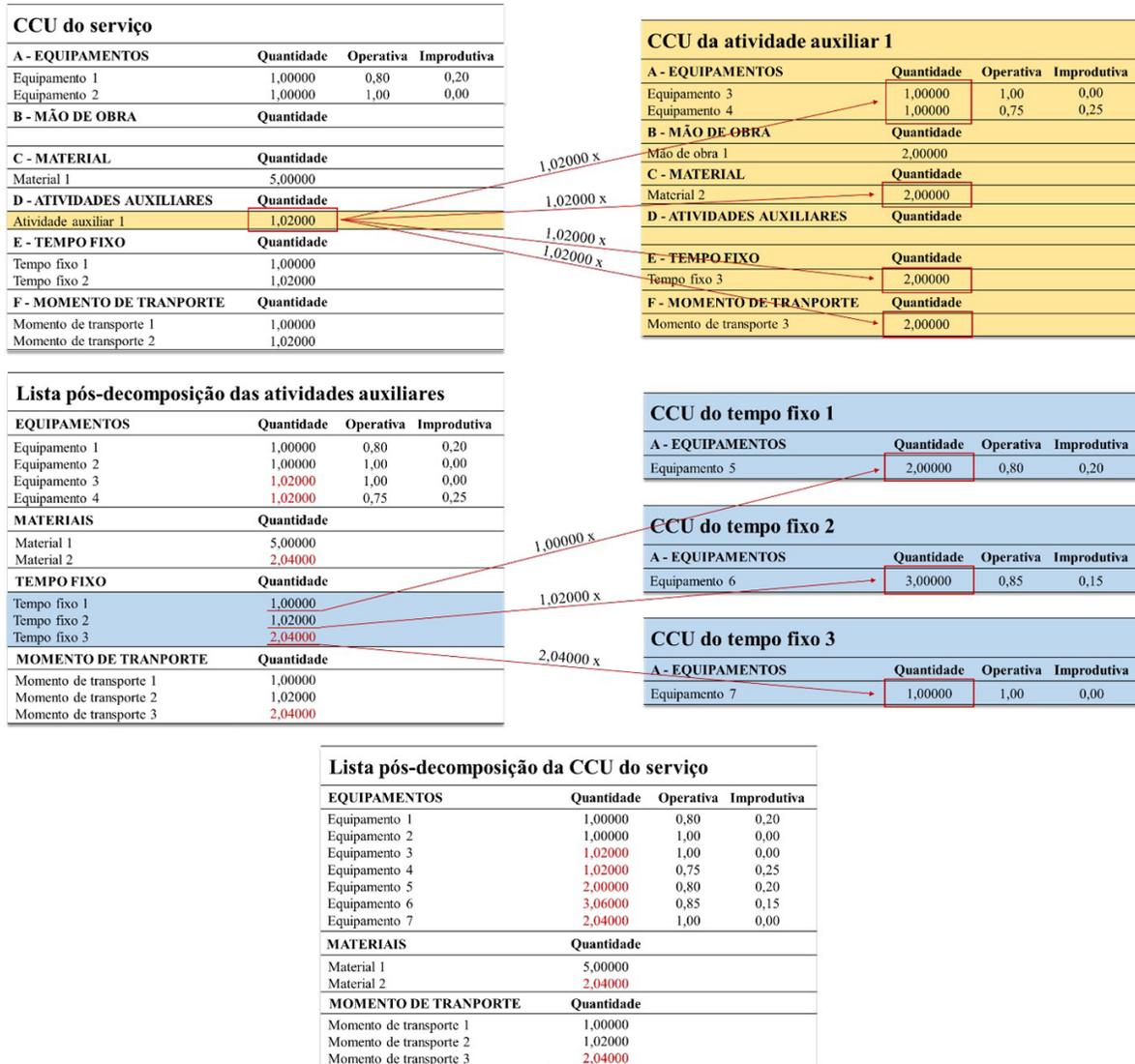


Figura 3. Exemplo de decomposição de CCU.

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 CO_2 “ $FCO_{2,pro}$ ” 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 brasileira.

3.3. Cálculo de CE e ECO_2 nas operações de transporte

As operações de transporte necessárias para o deslocamento de materiais e atividades auxiliares empregados 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.

O cálculo proposto para o consumo energético e emissão de CO₂ se dá a partir das atividades de momento de transporte de materiais e atividades auxiliares.

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

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

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, 2022) 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 Transporte, Volume 01 (DNIT, 2017). Por sua vez, a distância média “ DMT_{equ} ” consiste na projeção horizontal 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 embutida e de emissão de CO₂ dos combustíveis (diesel e gasolina, principalmente), de acordo com as Equações 4 e 5, respectivamente.

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

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

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_{2tra} emissão de CO₂ do serviço nas operações de transporte [kgCO₂/UF]; FCO_{2com} fator de emissão de CO₂ do combustível [kgCO₂/l].

Tanto a energia embutida “ EE_{com} ” como o fator de emissão de CO₂ “ FCO_{2com} ” oriundos das operações de transporte devem ser apropriados tal como descrito no item 3.2.

3.4. Cálculo CE e ECO₂ nas 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.

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

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 3.3. 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 da própria CCU principal.

Multiplicando a energia embutida e o fator de emissão de CO_2 dos combustíveis pelo consumo de combustível, obtêm-se o consumo energético e a emissão de CO_2 das atividades executivas dos equipamentos do serviço, em conformidade com as Equações 7 e 8, respectivamente.

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

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

em que CE_{exe} consumo energético do serviço nas atividades executivas dos equipamentos [M]/UF; EE_{com} energia embutida do combustível [M]/l; CC_{exe} consumo de combustível nas atividades executivas dos equipamentos [l/UF]; ECO_{2exe} emissão de CO_2 do serviço nas atividades executivas dos equipamentos [kg CO_2 /UF]; FCO_{2com} fator de emissão de CO_2 do combustível [kg CO_2 /l].

Novamente, a energia embutida " EE_{com} " e o fator de emissão de CO_2 " FCO_{2com} " relacionados às atividades executivas dos equipamentos devem ser obtidos conforme disposições do item 3.2.

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 CO_2 são contabilizados por meio dos geradores.

3.5. Cálculo de CE e ECO_2 total do serviço

O consumo energético e a emissão de CO_2 total do serviço são obtidos pela soma das parcelas de produção dos materiais (item 3.2), operações de transporte (item 3.3) e atividades executivas dos equipamentos (item 3.4), conforme indicado nas Equações 9 e 10, respectivamente.

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

em que CE_{tot} consumo energético total do serviço [M]/UF].

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

em que ECO_{2tot} emissão de CO_2 total do serviço [kg CO_2 /UF].

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Com intuito de validar o uso do método proposto neste artigo, elaborou-se um exemplo de sua aplicação.

Considerando que a unidade funcional da ACV-m deste método é definida pela unidade de medida da própria CCU do SICRO, as análises desenvolvidas diante de sua aplicação têm o potencial de comparar não apenas serviços, mas diversas estruturas e elementos, desde que esses possam ser descritos como um conjunto de composições de custos. Desse modo, a aplicação em questão compara os valores totais CE e ECO_2 por quilômetro de implantação de duas soluções de pavimento com finalidades compatíveis (asfáltico *versus* de concreto de cimento Portland).

As soluções-tipo comparadas foram dimensionadas para um mesmo número N, segundo DNIT (2019, p. 44), ambas com semipista de 3,6 m e acostamento com 2,5 m. A solução-tipo F (Figura 4) consiste na construção de pavimento com sub-base de brita graduada (20 cm), base de brita graduada tratada com cimento (20 cm) e revestimento de concreto asfáltico (15 cm na camada de rolamento; 10 cm nos acostamentos), sendo dimensionada para uma vida de serviço de 10 anos. Já a solução-tipo G (Figura 5) conta com sub-base de concreto compactado com rolo (10 cm) e revestimento de concreto de cimento Portland (22 cm), dimensionada para uma vida de serviço de 20 anos.

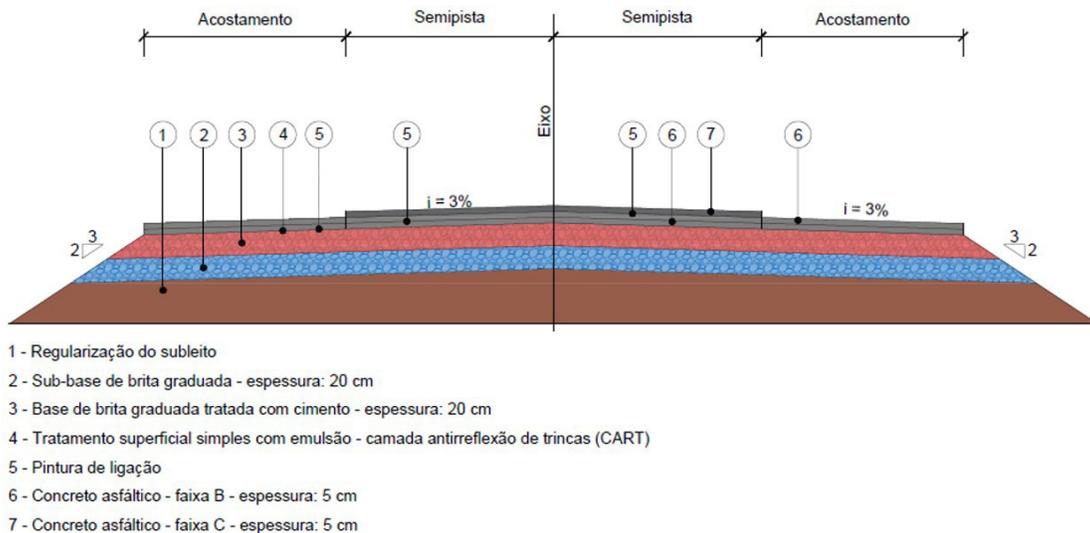


Figura 4. Perfil da solução-tipo F (pavimento asfáltico) [adaptado de: DNIT, 2019].

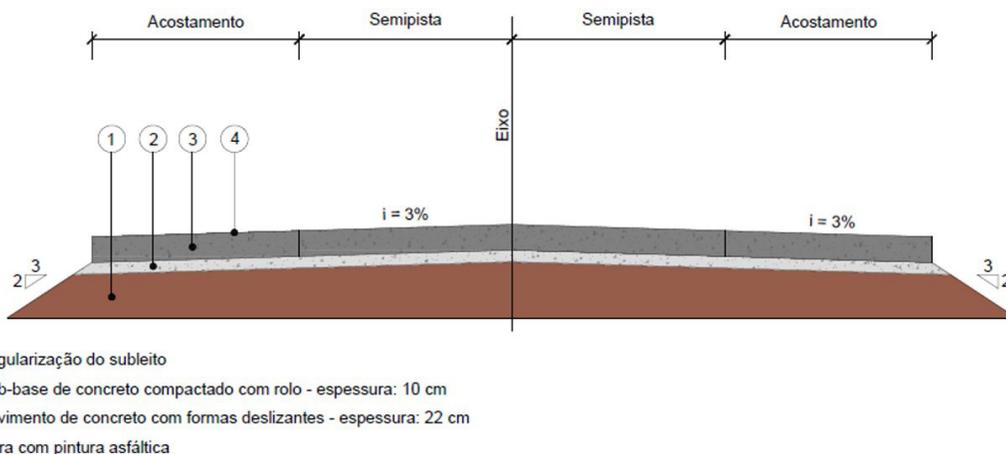


Figura 5. Perfil da solução-tipo G (pavimento de concreto de cimento Portland) [adaptado de: DNIT, 2019].

Nesse sentido, tem-se as CCUs e quantitativos evidenciados na Tabela 1 para cada uma dessas soluções, por quilômetro de via.

Tabela 1: Serviços contemplados em cada solução-tipo e seus quantitativos por quilômetro de via.

Solução-tipo	Código SICRO	Descrição	UF	Quantidade (UF/km)
F (pavimento asfáltico)	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
G (pavimento de concreto de cimento Portland)	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

Definidas as composições de custos e seus quantitativos em cada uma das soluções-tipo comparadas, avançou-se para a etapa de obtenção dos valores de CE e ECO₂ para essas CCUs, conforme método apresentado no decorrer do item 3. Dado o grande número de composições de custos elencadas, este exemplo de aplicação 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.

4.1. Decomposição da CCU

A lista pós-decomposição da CCU demonstrada neste exemplo é apresentada na Tabela 2.

4.2. Produção dos materiais

Para a primeira parcela, referente à etapa de produção dos materiais, deve-se obter as massas dos insumos por Unidade Funcional, ou seja, 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, em t/UF.

Tabela 2: Lista pós-decomposição da CCU do serviço 4011463.

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	
	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

Tratando da EE e do FCO₂ de cada material, os valores utilizados neste exemplo de aplicação são apresentados na Tabela 3, cuja obtenção ocorreu da seguinte maneira:

- Coleta de dados de EE e FCO₂ em referenciais bibliográficos nacionais, com o propósito de retratar mais adequadamente o cenário brasileiro;
- Cálculo do coeficiente de variação (CV) dos dados coletados;
- Cálculo da medida de tendência central mais adequada para representar os parâmetros de EE e FCO₂ de cada material:
 - Mediana: adotada quando o CV foi maior do que 25% (dados heterogêneos);
 - Média: adotada quando o CV foi menor ou igual a 25% (dados homogêneos).

Tabela 3: 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)	CV	Tratamento estatístico	Fonte	Valor (kgCO ₂ /un)	CV	Tratamento estatístico	Fonte
Areia	t	50,50	49%	Mediana	Souza (2017), Lobo (2010), Souza (2012), CBCS (2014), Tavares (2006)	5,45	64%	Mediana	Lobo (2010), Santoro e Kripka (2016), Stachera (2008), Souza (2012), CBCS (2014), Isaia e Gastaldini (2008)
Brita	t	55,30	71%	Mediana	Rossi (2013), Tavares (2006), CBCS (2014), Souza (2017), Lobo (2010)	1,90	87%	Mediana	Rossi (2013), Santoro e Kripka (2016), CBCS (2014), Lobo (2010)
Cimento	t	3.887,17	19%	Média	Tavares (2006), Silva (2013), CBCS (2014), Souza (2017)	706,28	15%	Média	Costa (2012), CBCS (2014), Silva (2013)
Aço	t	30.000,00	30%	Mediana	Tavares (2006), Nabut Neto (2011), Silva (2013), Saade et al. (2014), Souza (2017), Lobo (2010)	1.721,70	24%	Média	Costa (2012), Silva (2013), Stachera (2008), Saade et al. (2014), Lobo (2010)
Cal	t	4.063,67	22%	Média	Tavares (2006), Souza (2017), Lobo (2010)	2.114,30	48%	Mediana	Lobo (2010), Silva (2013)
Materiais asfálticos	t	51.000,00	-	-	Tavares (2006)	307,00	-	-	Silva (2013)
Óleo tipo A1	l	45,00	-	-	Silva (2013)	4,00	-	-	Silva (2013)
Diesel	l	36,26	2%	Média	Brasil (2022), Silva (2013)	3,13	5%	Média	Brasil (2022), Silva (2013)
Gasolina	l	35,00	-	-	Silva (2013)	2,66	-	-	Silva (2013)

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

4.3. Operações de transporte

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

No caso da CCU em epígrafe, considerou-se transporte para os insumos elencados na Tabela 2, observando os equipamentos indicados nas CCUs de momento de transporte. Definido o equipamento transportador, relacionaram-se os parâmetros “ FC_{equ} ”, “ P_{equ} ” e “ Cap_{equ} ” informados pelo SICRO para cada um deles.

Para este exemplo, definiu-se que o transporte entre canteiro e frente de serviço (transporte interno) acontece em leito natural (velocidade: 40 km/h), enquanto o transporte entre fornecedor dos materiais e canteiro (transporte externo) é realizado em via pavimentada (velocidade: 60 km/h). Seguindo as premissas do CMG (DNIT, 2019), para o primeiro a DMT adotada foi de 9 km, enquanto a distância média do transporte externo foi de 50 km. A exceção se dá para os materiais betuminosos, para os quais a distância adotada para as emulsões foi de 229,58 km, ao passo que para o cimento asfáltico de petróleo (CAP) foi de 299,47 km.

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

Tabela 4: Consumo de combustível no transporte do serviço 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
M1103	Pedrisco	0,21021	50,00	60	E9579	0,14	188	15	0,61474
M1943	Cimento asfáltico de petróleo 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

ET representa o código SICRO do equipamento transportador.

Sabendo que todos os equipamentos transportadores deste exemplo são movidos à diesel, utilizaram-se os valores de EE e FCO_2 apresentados na Tabela 3, resultando no consumo energético e emissão de CO_2 para cada material e para o serviço. Vale salientar que os materiais asfálticos não têm serviço de transporte associado à parcela F nas CCUs do SICRO. Isso acontece porque os custos de transporte desses materiais são remunerados por meio de equação tarifária no âmbito do sistema. Assim, ao utilizar esta metodologia, é importante avaliar cada um dos insumos para julgar de forma particular a necessidade do transporte para eles.

4.4. Atividades 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 2, bem como de dados do SICRO para apropriação dos parâmetros “ P_{ser} ”, “ FC_{equ} ” e “ P_{equ} ”. A Tabela 5 exhibe o cálculo do consumo de combustível por equipamento.

Tabela 5: Consumo de combustível nas atividades executivas do serviço 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	25,97	0,19	265	0,11114

A partir dos valores de EE e FCO_2 apresentados na Tabela 3 para o combustível empregado, tem-se o CE e a ECO_2 para as atividades executivas de cada equipamento no serviço. Salienta-se que, conforme orientado ao final do item 3.4, a contribuição dos equipamentos elétricos foi calculada a partir dos grupos geradores.

4.5. Total dos serviços

Seguindo a lógica das parcelas demonstradas nos itens anteriores, calcularam-se os valores totais de CE e ECO_2 para cada um dos serviços necessários às soluções de pavimentos estudadas, cujos resultados se encontram na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de CE_{tot} e ECO_{2tot} por serviço.

Código SICRO	Descrição	UF	CE_{pro} (MJ/UF)	CE_{tra} (MJ/UF)	CE_{exe} (MJ/UF)	CE_{tot} (MJ/UF)	ECO_{2pro} (kgCO ₂ /UF)	ECO_{2tra} (kgCO ₂ /UF)	ECO_{2exe} (kgCO ₂ /UF)	ECO_{2tot} (kgCO ₂ /UF)
4011209	Regularização do subleito	m ²	-	-	5,15	5,15	-	-	0,44	0,44
4011276	Base ou sub-base de brita graduada	m ³	121,66	296,27	62,99	480,92	4,18	25,57	5,44	35,19
4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento	m ³	458,86	295,50	68,50	822,87	66,17	25,51	5,91	97,59
4011358	Tratamento superficial simples com emulsão	m ²	76,54	1,73	1,45	79,72	0,48	0,15	0,13	0,75
4011353	Pintura de ligação	m ²	22,95	0,20	0,66	23,81	0,14	0,02	0,06	0,21
4011463	Concreto asfáltico faixa C	t	3.569,82	168,74	76,86	3.815,42	144,50	14,57	6,63	165,70
4011459	Concreto asfáltico faixa B	t	3.208,25	165,52	76,64	3.450,41	132,68	14,29	6,62	153,59
4011212	Varredura da superfície	m ²	-	-	0,21	0,21	-	-	0,02	0,02
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo	m ³	515,91	322,33	77,39	915,63	75,00	27,82	6,68	109,50
4011538	Cura com pintura asfáltica	m ²	58,65	0,52	0,61	59,78	0,35	0,04	0,05	0,45
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes	m ³	1.706,21	303,04	94,79	2.104,03	267,49	26,16	8,18	301,83
4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto	m	-	0,01	25,94	25,94	-	-	2,21	2,21

É importante ressaltar que alguns materiais menos representativos no sentido da contribuição em massa nos serviços foram desconsiderados nas parcelas de produção e transporte dos materiais em razão da ausência de valores de referência para energia embutida e fator de emissão. São eles: aditivo de cura para concreto, cordão de polietileno expandido de baixa densidade, disco de corte diamantado, selante elástico à base de poliuretano e asfalto, aditivo incorporador de ar e aditivo plastificante e retardador de pega.

Além disso, não foi possível contemplar o consumo energético e emissões das parcelas de tempos fixo dos materiais asfálticos e do óleo tipo A1 uma vez que o SICRO não contempla as CCUs de carga, manobra e descarga desses insumos.

Por fim, relacionando os valores obtidos por UF com os quantitativos de cada CCU nas duas soluções-tipo de pavimento comparadas neste estudo (vide Tabela 1), tem-se, na Tabela 7, o consumo energético e a emissão de CO₂ por quilômetro para a solução-tipo F de pavimento asfáltico e para a solução-tipo G de pavimento de concreto de cimento Portland.

Tabela 7: Valores de CE_{tot} e ECO_{2tot} por solução-tipo.

Solução-tipo	Código SICRO	Descrição	CE_{pro} (GJ/km)	CE_{tra} (GJ/km)	CE_{emb} (GJ/km)	CE_{tot} (GJ/km)	ECO_{2pro} (tCO ₂ /km)	ECO_{2tra} (tCO ₂ /km)	ECO_{2emb} (tCO ₂ /km)	ECO_{2tot} (tCO ₂ /km)
F (pavimento asfáltico)	4011209	Regularização do subleito	-	-	69,01	69,01	-	-	5,96	5,96
	4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	318,75	776,24	165,03	1.260,01	10,95	67,01	14,25	92,20
	4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita comercial	1.147,16	738,76	171,25	2.057,17	165,41	63,77	14,78	243,97
	4011358	Tratamento superficial simples com emulsão - brita comercial	933,83	21,14	17,67	972,63	5,81	1,82	1,53	9,16
	4011353	Pintura de ligação	725,22	6,41	20,81	752,44	4,37	0,55	1,80	6,71
	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	3.084,33	145,79	66,41	3.296,52	124,85	12,58	5,73	143,17
	4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	9.393,75	484,64	224,42	10.102,80	388,49	41,83	19,37	449,70
	4011212	Varredura da superfície para execução de revestimento asfáltico	-	-	9,06	9,06	-	-	0,78	0,78
	Total		15.603,03	2.172,97	743,65	18.519,64	699,88	187,57	64,19	951,65
G (pavimento de concreto)	4011209	Regularização do subleito	-	-	68,49	68,49	-	-	5,91	5,91
	4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	678,42	423,87	101,76	1.204,05	98,62	36,59	8,78	143,99
	4011538	Cura com pintura asfáltica para pavimento de concreto compactado com rolo	715,53	6,32	7,42	729,27	4,31	0,55	0,64	5,49
	4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	4.579,46	813,35	254,41	5.647,21	717,96	70,21	21,96	810,12
	4011537	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	-	0,03	98,16	98,19	-	-	8,36	8,36
	Total		5.973,41	1.243,57	530,24	7.747,22	820,88	107,35	45,66	973,89

É relevante para esta análise relacionar os valores absolutos calculados com as vidas úteis de serviço para as quais cada tipo de pavimento em questão foi projetado, de forma a evidenciar as contribuições de consumo energético e emissão de CO₂ por ano, conforme disposto na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros por ano das solução-tipo analisadas.

Tipo de pavimento	CE _{tot} (GJ/km)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km)	Vida de serviço (anos)	CE _{tot} (GJ/km/ano)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km/ano)
Asfáltico	18.519,64	951,65	10	1.851,96	95,16
Concreto	7.747,22	973,89	20	387,36	48,69

Ao transformar essas quantificações totais em valores por ano, a disparidade entre o consumo energético do pavimento asfáltico e de concreto aumentou significativamente, sendo esse primeiro 4,8 vezes superior. Em que pese o pavimento de concreto emita uma massa de CO₂ 2,3% maior em valores absolutos, sua vida de serviço é o dobro daquela designada para o pavimento asfáltico, fazendo com que sua contribuição de dióxido de carbono por ano seja 51% inferior.

Conforme ilustrado na Figura 6, ambas as soluções de pavimento apresentaram a fase de produção dos materiais como a mais significativa em relação aos parâmetros estudados. Para a solução asfáltica, essa etapa representou 84% do consumo de energia total e 74% da emissão de CO₂. Já no pavimento de concreto, os índices foram de 77% e 84% respectivamente.

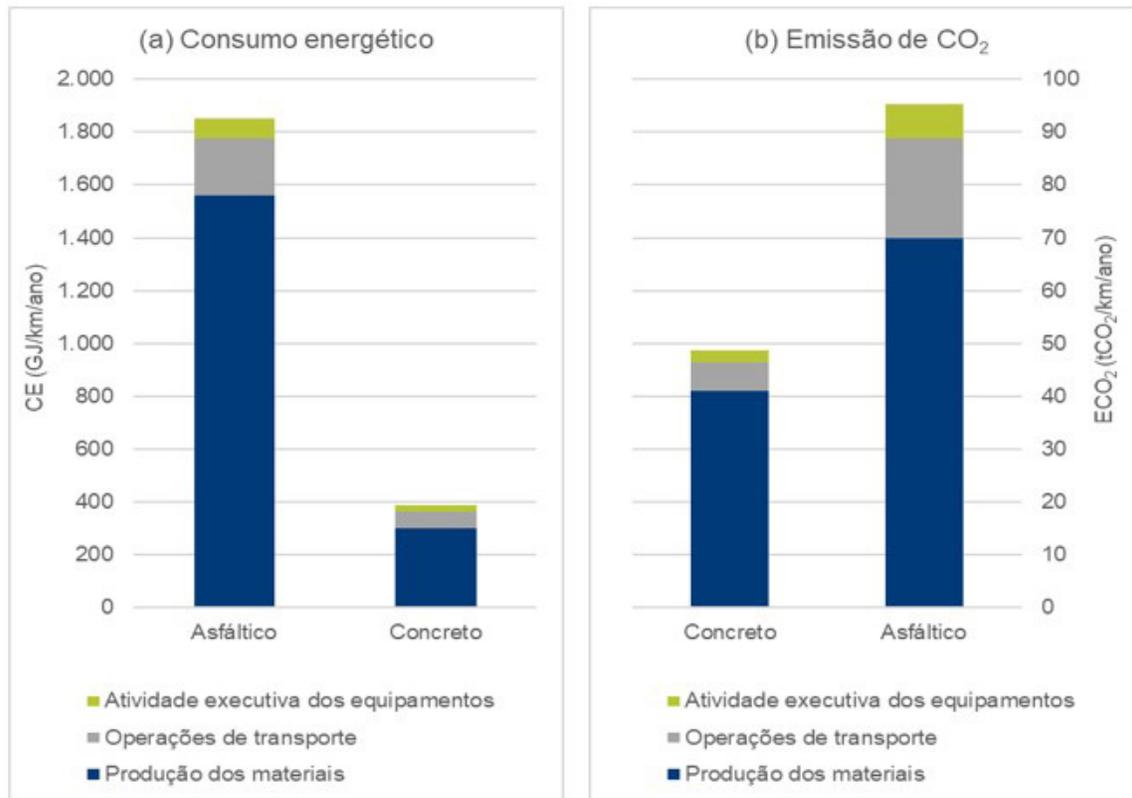


Figura 6. Consumo energético e emissão de CO₂ por etapa para cada solução-tipo. (a) gráfico relativo ao consumo energético por etapa para cada solução-tipo, em GJ/km/ano; (b) emissão de CO₂ por etapa para cada solução-tipo, em tCO₂/km/ano.

Analisando a etapa de produção dos materiais evidenciada nas Figura 7, nota-se que os materiais asfálticos representam a maior parcela de contribuição de consumo energético para o pavimento asfáltico, ao passo que o cimento Portland reflete 69% do CE na solução-tipo de pavimento de concreto.

No requisito da emissão de CO_2 , a Figura 8 demonstra que o cimento Portland foi o material mais significativo no pavimento de concreto, representando 92% das emissões, enquanto o material de destaque na solução-tipo asfáltica foi a cal, sendo responsável por 62% das emissões. Apesar do consumo de cal por quilômetro de pavimento ser 20% inferior ao de material asfáltico, a maior representatividade da cal nessa solução decorre do seu elevado fator de emissão, quase 7 vezes o valor atribuído aos materiais asfálticos e 3 vezes ao cimento.

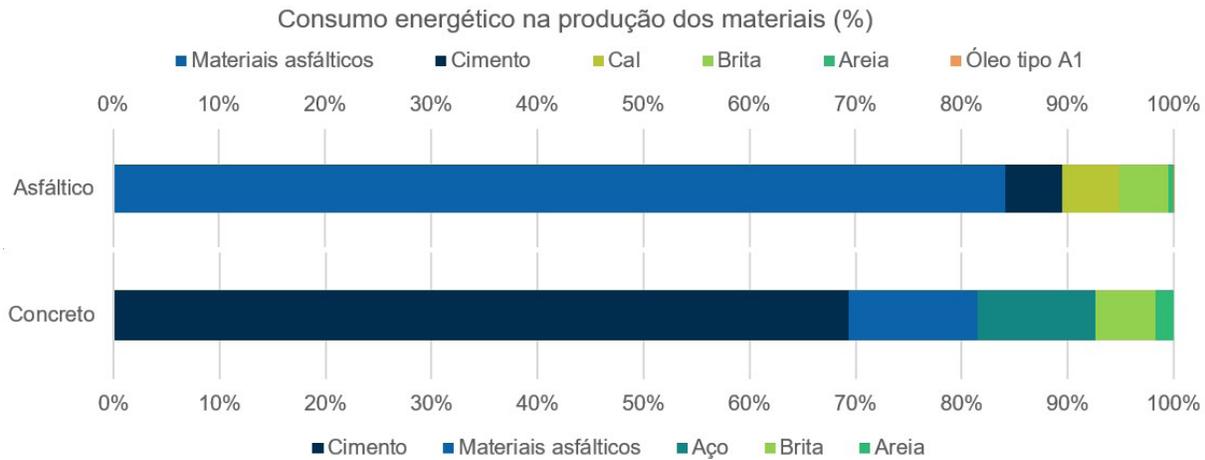


Figura 7. Consumo energético por insumo na etapa de produção dos materiais.

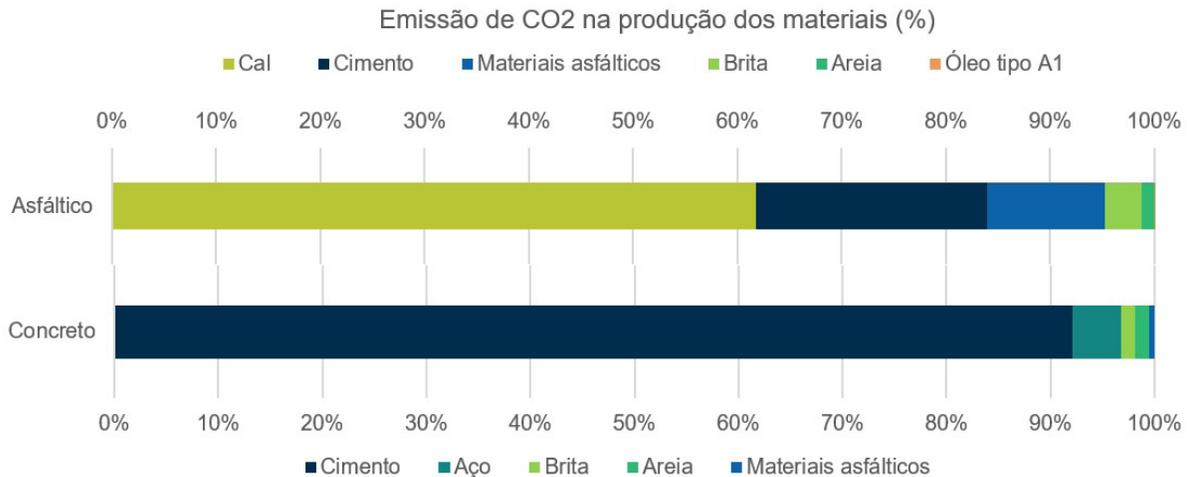


Figura 8. Emissão de CO_2 por insumo na etapa de produção dos materiais.

Os resultados obtidos convergem com os apresentados por Zhou et al. (2022), Machado (2020) e Souza (2017), que indicam um melhor desempenho do pavimento de concreto em termos de consumo energético em relação ao pavimento asfáltico. Por outro lado, esses autores obtiveram maiores emissões de CO_2 no pavimento de concreto para uma mesma vida de serviço, diferença que pode ser atribuída ao fator de emissão associado ao cimento Portland nesses estudos que, em alguns casos, foi quase 40% superior à referência usada na aplicação em tela.

A etapa de produção dos materiais, para ambas as soluções, foi apontada por Zhou et al. (2022), Machado (2020) e Souza (2017) como a maior responsável pelo consumo de energia e emissão de gases.

Em estudo realizado nos Estados Unidos para esses dois tipos de pavimento, Zapata e Gambatese (2005) apontaram um consumo energético 16,37% inferior para a solução asfáltica em comparação

com o valor obtido para o pavimento de concreto. Essa diferença pode ser fundamentada por causas como: tecnologias diferentes, disponibilidade de matéria-prima e fontes de referência distintas. Outro ponto importante é a diferença entre as matrizes energéticas de cada país. No Brasil, 48% da energia ofertada em 2020 foi proveniente de fontes renováveis, enquanto esse indicador em países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) como os Estados Unidos foi de 11% em 2018 (EPE, 2021).

Com o intuito de comparar os resultados da metodologia proposta, realizou-se a análise de inventário da ACV-m das duas estruturas avaliadas neste exemplo por meio do *software* OpenLCA, utilizando a base de dados Ecoinvent e modelo de sistema *cut-off*. Os resultados obtidos são demonstrados na Figura 9, sendo plotados junto dos valores calculados neste exemplo de aplicação.

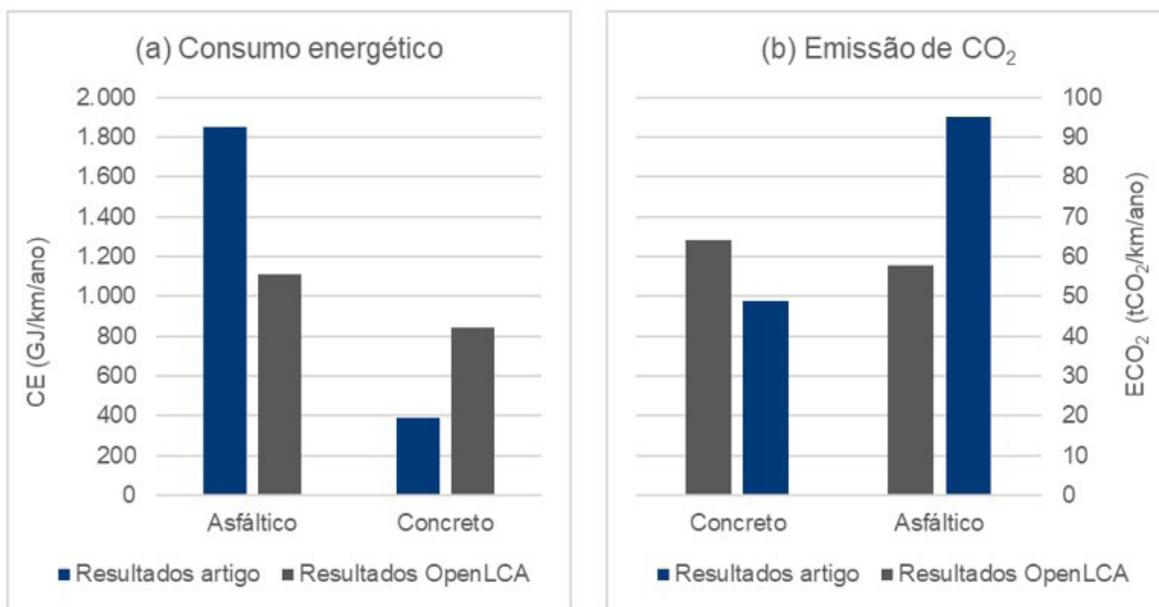


Figura 9. Comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto e pelo software OpenLCA. (a) gráfico relativo à comparação entre os resultados de consumo energético obtidos pelo método proposto e pelo software OpenLCA; (b) representa a comparação entre os resultados de emissão de CO₂ obtidos pelo método proposto e pelo software OpenLCA.

Sob a ótica do consumo energético, os resultados do OpenLCA também apontam o melhor desempenho do pavimento de concreto. Já no âmbito da emissão de CO₂, os cenários se invertem, uma vez que análise de inventário realizada no OpenLCA indica maiores emissões para o pavimento de concreto.

Divergências nas quantificações dos dois métodos são esperadas, principalmente devido ao fato de o OpenLCA utilizar valores distintos dos empregados neste exemplo de aplicação para os fatores de consumo energético e emissão dos materiais, os quais são parâmetros altamente sensíveis na análise do inventário da 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, 2024). Não obstante, entende-se que os resultados obtidos pelo OpenLCA contribuem para validar o método proposto neste artigo, uma vez que ambos dispõem de ordens de grandeza aproximadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nota-se que este estudo avança no conhecimento científico acerca do tema ao ser pioneiro na proposição de equações e interrelações para serviços de engenharia de infraestrutura de transporte.

O sucesso da aplicação do método nas duas soluções de pavimentação investigadas evidenciou sua aplicabilidade em serviços de infraestrutura de transportes modelados pelas composições de custos do SICRO. Por meio dela, foi possível comparar os impactos ambientais associados ao consumo energético e à emissão de CO_2 dos pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland adotados para o estudo.

Ao longo do desenvolvimento do exemplo de aplicação, a etapa de decomposição da CCU demonstrou-se como a mais trabalhosa, uma vez que foi necessário acessar cada uma das composições de custos auxiliares e de transporte para elaborar a lista pós-decomposição da CCU de cada serviço.

Na etapa de cálculo de CE e ECO_2 na produção dos materiais, a definição da energia embutida e do fator de emissão de CO_2 na produção de alguns materiais foi prejudicada pela escassez de referenciais bibliográficos nacionais que representam a realidade desejada. Inclusive, determinados materiais precisaram ser desconsiderados da análise em virtude da ausência de dados.

Outro fator que chamou a atenção foi a discrepância entre valores de EE e FCO_2 informados por diferentes autores para um mesmo material, como a areia, que tem um fator de emissão de CO_2 de 14,42 kgCO_2/t , segundo Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2008), enquanto Santoro e Kripka (2016) indicam 3,78 kgCO_2/t para o mesmo material. 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.

Já no cálculo referente às 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.

Em relação às atividades executivas dos equipamentos, notou-se a ausência de CCUs de tempo fixo para materiais asfálticos e combustíveis, o que impossibilitou a consideração dessa parcela para tais insumos.

6. CONCLUSÕES

Como principal contribuição deste estudo, tem-se a proposição de um método de obtenção do consumo energético e emissão de CO_2 em obras de infraestrutura de transporte a partir dos dados públicos do SICRO, trazendo inovação no uso desse sistema de referência nacional. Seu emprego permite que sejam estimados os impactos ambientais relacionados ao CE e ECO_2 dos serviços de determinada obra, bem como comparadas diferentes soluções técnicas de engenharia à luz desses fatores.

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 artigo é uma ferramenta importante para robustecer as avaliações referentes à sustentabilidade em projetos de infraestrutura no Brasil. É importante para o desenvolvimento da malha de transporte brasileira que as diretrizes de projeto não envolvam apenas o custo de implementação, mas também conceitos relacionados à sustentabilidade ambiental.

Conforme citado nas discussões deste artigo, há escassez de informações nacionais para a energia embutida e o fator de emissão de CO₂ decorrentes da produção dos materiais utilizados nos serviços de infraestrutura de transportes. Consequentemente, pesquisas futuras voltadas à consolidação de uma base de dados nacional com esses parâmetros 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.

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 de um empreendimento como um todo. Além disso, pesquisas futuras podem avançar para as etapas não contempladas nesta ACV-m, quantificando o CE e ECO₂ nas fases de uso e demolição dos elementos construídos. Por fim, o desenvolvimento de um programa que possibilite a aplicação deste método em maior escala e de forma automatizada consiste em relevante avanço para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- Brasil (2013) Decreto nº 7.985, de 8 de abril de 2013. Altera o Decreto no 7.784, de 7 de agosto de 2012, que aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções Gratificadas do Ministério do Esporte, e remaneja cargo sem comissão. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/decreto-n-7-985-de-8-de-abril-de-2013-30434217>> (acesso em 05/05/2022).
- Brasil (2021) Decreto nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.133-de-1-de-abril-de-2021-311876884>>. (acesso em 05/05/2022).
- Brasil (2022) *Cálculo dos Fatores de Emissão de CO₂ pela Geração de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil*. Brasília. Disponível em: <http://www.reciclecarbono.com.br/index_biblio.htm> (acesso em 05/05/2022).
- CBCS (2014) *Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto*. São Paulo: Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. Disponível em: <https://blocobrasil.com.br/wp-content/uploads/2021/09/01-CBCS_ACV-blocos-concreto.pdf> (acesso em: 22/05/2022).
- CNT (2017) *Transporte Rodoviário: Por Que os Pavimentos das Rodovias do Brasil não Duram?* Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>> (acesso em: 22/05/2022).
- CNT/SEST/SENAT (2021) *Pesquisa CNT de Rodovias 2021*. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, Serviço Social do Transporte, Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. Disponível em: <<https://static.poder360.com.br/2021/12/pesquisa-cnt-rodovias.pdf>> (acesso em: 14/05/2022).
- Costa, B.L.C. (2012) *Quantificação das Emissões de CO₂ Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. DOI: 10.13140/RG.2.1.2161.8801.
- Di Domênico, M.; T.L. Silva and L.A. Ribeiro (2021) Avaliação de Ciclo de Vida dos sistemas construtivos de uma unidade habitacional de interesse social, *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 10, n. 1, e20442. DOI: 10.5585/geas.v10i1.20442.
- DNIT (2017) *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes* (Volume 1: Metodologia e Conceitos). Brasília, DF: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 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/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes/volume01metodologiaeconceitos.rar> (acesso em 14/05/2022).
- DNIT (2019) *Manual de Custos Médios Gerenciais* (Volume 01: Manual de Metodologia). Brasília, DF: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/documentos/ManualdeCMGVol01ManualdeMetodologia_.pdf> (acesso em 14/05/2022).
- DNIT (2022) *Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos*. Brasília, DF: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 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 14/05/2022).
- ECOQUERY (2024). *Database Search*. Disponível em: <<https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/search>> (acesso em 15/01/2024).
- EPE (2021) *Atlas da Eficiência Energética Brasil - Relatório de Indicadores*. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021>> (acesso em 14/05/2022).

- Isaia, G.C. and A.L.G. Gastaldini (2008) Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. *Ambiente Construído*, v. 4, n. 2, p. 19-30. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3537>> (acesso em 14/05/2022).
- ISO (2006) *ISO 14044:2006: Environmental Management - Life cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. Geneva: International Standards Organization.
- Lobo, F.H.R. (2010) *Inventário de Emissão Equivalente de Dióxido de Carbono e Energia Embutida na Composição de Serviços em Obras Públicas: Estudo de Caso no Estado do Paraná*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/24855>> (acesso em: 22/04/2022).
- Machado, C.N. (2020) *Análise do Ciclo de Vida (ACV) de Pavimento Asfáltico e Rígido na BR-163/364/MT*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação Avaliação de Impactos Ambientais, Universidade La Salle, Canoas. Disponível em: <<http://repositorio.unilasalle.edu.br/bitstream/11690/1656/1/cnmachado.pdf>> (acesso em: 22/04/2022).
- Nabut Neto, A.C. (2011) *Energia Incorporada e Emissões de CO₂ de Fachadas: Estudo de Caso do Steel Frame para Utilização em Brasília*. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/9837>> (acesso em: 22/04/2022).
- Oliveira, L.S. (2015). *Avaliação do Ciclo de Vida de Blocos de Concreto do Mercado Brasileiro: Alvenaria e Pavimentação*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-13072016-152611/>> (acesso em: 22/04/2022).
- Paulsen, J. and R. Sposto (2013) A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: case study for the program “My House My Life”, *Energy and Building*, v. 57, p. 95-102. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.11.014.
- Rossi, E. (2013) *Avaliação do Ciclo de Vida da Brita para a Construção Civil: Estudo de Caso*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4359>> (acesso em 17/04/2022).
- Saade, M.R.M.; M.G. Silva; V. Gomes et al. (2014) Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings. *Smart and Sustainable Built Environment*, v. 3, n. 1, p. 54-71. DOI: 10.1108/sasbe-04-2013-0024.
- Santoro, J.F. and M. Kripka (2016) Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul, *Ambiente Construído*, v. 16, n. 2, p. 35-49. DOI: [10.1590/s1678-86212016000200078](https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000200078).
- Savietto, J.P. (2017) *Análise de Impactos Ambientais da Restauração de Pavimentos Asfálticos pela Avaliação do Ciclo de Vida*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-12092017-125206/pt-br.php>> (acesso em 15/04/2022).
- Silva, B.V. (2013) *Construção de Ferramenta para Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-15052013-103100/>> (acesso em 22/04/2022).
- Souza, A. (2012) *Avaliação do Ciclo de Vida da Areia em Mineradora de Pequeno Porte, na Região de São José do Rio Preto, SP*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4333>> (acesso em 22/04/2022).
- Souza, L.P. (2017) *Uso Integrado das Ferramentas de Análise do Ciclo de Vida e de Análise do Custo do Ciclo de Vida em Pavimentação*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27112017-142625/>> (acesso em 22/04/2022).
- Stachera Jr., T. (2008) Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. In *Anais XXVIII Encontro Nacional de Engenharia da Produção*. Rio de Janeiro: ENEGEP, p. 1-13.
- Tavares, S.F. (2006) *Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89528>> (acesso em 22/04/2022).
- WEF (2019) *The Global Competitiveness Report 2019*. Cologny, Switzerland: World Economic Forum.
- Zapata, P. and J.A. Gambatese (2005) Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 11, n. 1, p. 9-20. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9).
- Zhou, X.; X. Zhang; Y. Zhang et al. (2022) Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: *Comparative cases in Shanxi Province*. *Construction & Building Materials*, v. 315, p. 125738. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125738.