



Quantificação do consumo energético e emissão de CO₂ em Obras de Arte Especiais **Sandra Patricia Echeverria Fernandez¹, Ana Clara Matos de Carvalho², Ivana de Jesus Cavalcante³, Lidiane Oliveira Blank⁴**

¹ Fundação Getulio Vargas / sandra.fernandez@fgv.br

² Fundação Getulio Vargas / ana.matos@fgv.br

³ Fundação Getulio Vargas / ivana.cavalcante@fgv.br

⁴ Votorantim Cimentos / lidiane.blank@vcimentos.com

Resumo

A qualidade da infraestrutura de transportes é vital para o desenvolvimento socioeconômico de um país. Diante da crescente necessidade de harmonizar o progresso social e econômico com a sustentabilidade ambiental, é imperativo que a viabilidade dos investimentos no setor de infraestrutura de transportes leve em consideração os impactos ambientais.

Nesse contexto, a presente pesquisa busca avaliar o consumo energético e as emissões de CO₂ de uma solução tipo de Obra de Arte Especial, utilizando as ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desenvolvidas pela FGV. O método proposto está estruturado em duas etapas principais: (1) a definição do tipo de Obra de Arte Especial e (2) o cálculo do consumo energético e da emissão de CO₂, permitindo uma análise detalhada dos impactos ambientais dessa infraestrutura.

Baseando-se em parâmetros do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) e do Custo Médio Gerencial (CMG) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a pesquisa identifica variações significativas no consumo energético e nas emissões de CO₂ associadas às soluções estruturais de concretos de cimento Portland. Este estudo se destaca pela sua abordagem inovadora, trazendo à tona a importância da sustentabilidade em projetos de infraestrutura, especialmente em obras de pontes, que são fundamentais para a conectividade e mobilidade.

A relevância deste tema é amplificada pela urgência de incorporar práticas sustentáveis nas decisões de investimento em infraestrutura, considerando não apenas os custos imediatos, mas também os custos sociais e ambientais a longo prazo. Ao contribuir para a inclusão da agenda ambiental nas decisões de infraestrutura de transportes, esta pesquisa oferece um método que é replicável e adaptável a diferentes contextos, promovendo uma construção mais responsável e consciente. Dessa forma, esperamos incentivar a adoção de soluções que minimizem impactos ambientais e promovam um desenvolvimento mais sustentável para as gerações futuras.

Palavras-chave

Emissão de CO₂; Consumo energético; Obras de arte especiais.

INTRODUÇÃO

As Obras de Arte Especiais (OAEs) são essenciais para assegurar o desenvolvimento econômico nacional e funcionam como canais vitais de transporte (Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2021). Essas estruturas desempenham um papel importante na infraestrutura viária, permitindo a conexão entre diferentes regiões e facilitando a mobilidade urbana e interurbana. Entretanto, a construção e manutenção dessas estruturas apresentam desafios significativos, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental.

No Brasil, os investimentos em infraestrutura vêm diminuindo desde 2014, resultando na deterioração dos ativos existentes e na necessidade de soluções inovadoras para otimizar a alocação de recursos (ABDIB, 2022). Para mitigar os gargalos do setor de transportes e logística, estima-se que seria necessário um investimento anual equivalente a 2,26% do Produto Interno Bruto (PIB), no entanto, em 2021, esse percentual foi de apenas 0,35% (ABDIB, 2022). A insuficiência desses investimentos compromete diretamente a qualidade das OAEs, impactando a eficiência do transporte e aumentando os custos de manutenção.

Além dos desafios estruturais, a construção das OAEs tem um impacto ambiental significativo, uma vez que a produção dos materiais empregados, como concreto e aço, está associada a elevados índices de consumo energético e emissões de gases de efeito estufa. Em 2016, a produção de cimento no Brasil foi

responsável por 24,9% das emissões totais desses gases, enquanto o setor metalúrgico, responsável pela fabricação do aço empregado no concreto armado, contribuiu com 48,2% (BRASIL, 2020).

A necessidade de integrar a pauta ambiental aos investimentos em infraestrutura torna-se cada vez mais evidente. O relatório "Infrastructure for Climate Action" (THACKER et al., 2021) aponta que 79% das emissões globais de gases de efeito estufa são provenientes de obras de infraestrutura, sendo 16% relacionadas especificamente ao setor de transportes. No Brasil, o modal rodoviário foi responsável por 94,3% do consumo total de energia do setor de transportes e pela emissão de 189 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente em 2016 (CNT, 2022).

Diante desse cenário, é essencial que as decisões sobre investimentos em infraestrutura não se restrinjam apenas à viabilidade técnica e econômica, mas também incorporem critérios de sustentabilidade, visando a redução dos impactos ambientais. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma metodologia eficiente para quantificar e analisar esses impactos, possibilitando a adoção de soluções mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida das OAEs.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o consumo energético e as emissões de CO₂ em uma solução tipo de Obra de Arte Especial, utilizando a metodologia de ACV. O método proposto pode ser replicado em diferentes contextos, fornecendo subsídios técnicos para a incorporação de aspectos ambientais na tomada de decisão em projetos de infraestrutura. Dessa forma, contribui para o avanço do conhecimento científico e fomenta discussões sobre a sustentabilidade no setor de transportes.

REFERENCIAL TEÓRICO

Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia amplamente utilizada para analisar os impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de todas as suas etapas, podendo ser desde a extração de matérias-primas até sua disposição final (ABNT, 2009). Esse processo envolve a quantificação de fluxos de entrada das matérias-primas, energia e água, considerando as fases analisadas do ciclo de vida da atividade. Isso permite mensurar diversos impactos, como o consumo de energia e as emissões de CO₂, entre outros.



Figura 1 - Ciclo de vida da atividade (Autores)

As Obras de Arte Especiais, como pontes e viadutos, são fundamentais para a mobilidade e o desenvolvimento econômico, sendo predominantemente construídas em concreto armado e projetadas para uma longa vida útil (CHEN et al., 2021). No entanto, sua construção e conservação geram impactos ambientais significativos, o que torna a ACV uma ferramenta importante para identificar e mitigar os efeitos ambientais ao longo do tempo. Dessa forma, a essa metodologia se destaca como uma ferramenta estratégica para aprimorar a sustentabilidade na infraestrutura viária.

Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)

Em 2017, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) implementou o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) como padrão para a orçamentação de obras e serviços sob sua responsabilidade. Posteriormente, com a promulgação da Lei nº 14.133 (BRASIL, 2021), em 1º de abril de 2021, as composições de custos unitários do SICRO passaram a ser adotadas como referência na definição do valor estimado para licitações e contratos de obras e serviços de engenharia em toda a Administração Pública direta, autárquica e fundacional da União.

O SICRO é constituído por composições de custos unitários, que permitem a especificação qualitativa e quantitativa dos insumos necessários para a execução de serviços (DNIT, 2017). Essas composições são estruturadas em seis parcelas principais: equipamentos, mão de obra, materiais, atividades auxiliares, tempo fixo e momento de transporte. Embora tenha sido desenvolvido para auxiliar na orçamentação de obras públicas de infraestrutura de transporte, seus parâmetros podem ser aplicados em diferentes contextos, como na avaliação de impactos ambientais associados aos serviços modelados por suas composições.

Custo Médio Gerencial (CMG)

O Custo Médio Gerencial (CMG) é uma metodologia utilizada para estimar os custos de obras rodoviárias com base em valores médios históricos e referenciais do mercado, proporcionando maior precisão no planejamento orçamentário e na gestão de contratos. Segundo o Manual de Custo Médio Gerencial (DNIT, 2019), essa abordagem permite a padronização de custos, otimizando a alocação de recursos e garantindo maior transparência nos investimentos em infraestrutura, como rodovias e obras de arte especiais.

Obras e Arte Especiais (OAE)

A construção de obras de arte especiais (e.g. pontes e viadutos) tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento urbano e na infraestrutura de transporte, permitindo a superação de obstáculos naturais e a conexão eficiente entre diferentes regiões. Essas estruturas são essenciais para garantir mobilidade contínua, segurança viária e o escoamento eficiente de cargas, contribuindo diretamente para o crescimento econômico e a integração territorial.

Segundo o DNIT (2004), uma ponte é definida como uma estrutura construída para vencer depressões ou obstruções, como rios, rodovias ou ferrovias, com um vão livre superior a seis metros. Já a escolha da tipologia construtiva dessas obras depende de fatores como geometria do terreno, carga de tráfego e condições ambientais, sendo as mais comuns as pontes em arco, vigas ou suspensas, enquanto os viadutos são geralmente compostos por vigas ou treliças.

Conforme a NBR 9452:2023, os elementos estruturais das Obras de Arte Especiais (OAE's) são classificados em três categorias: superestrutura, que suporta as cargas verticais e as transfere à mesoestrutura; mesoestrutura, composta por pilares e colunas que conectam a superestrutura à infraestrutura; e infraestrutura, responsável pela fundação e estabilidade da estrutura. Além disso, as OAE's incluem elementos de extremidade, sistemas de apoio e dispositivos de proteção e segurança, como barreiras e guarda-corpos.

MÉTODO

Este trabalho se propõe a analisar os elementos de superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura de uma solução tipo de OAE do CMG, por meio da quantificação do consumo energético e emissão de dióxido de carbono, desde a extração das matérias-primas até a construção das estruturas, conforme as fases do ciclo de vida da estrutura destacadas na figura 2.



Figura 2 - Fases do ciclo de vida contempladas nesse método (Autores)

Para isso, este método foi dividido em duas etapas: (1) definição da estrutura da OAE, (2) cálculo do consumo energético e emissão de CO₂.

Definição da estrutura OAE (Projeto-Tipo a ser analisado)

A seção de referência da OAE foi definida com base nas práticas construtivas mais comuns em obras recentes do DNIT, combinando elementos moldados *in loco* e pré-moldados. O tabuleiro, as travessas de apoio e os pilares são de concreto armado moldado *in loco*, enquanto as longarinas utilizam concreto protendido pré-moldado. Os aparelhos de apoio são de neoprene fretado, e os pilares contam com dois apoios por seção.

Para a análise deste estudo, adotou-se uma solução Tipo I, pré-dimensionada e quantificada com os principais dados para estimativa de custo de uma ponte em concreto armado e vigas de concreto protendido, com vão de 30 metros. O cálculo seguiu a metodologia do Custo Médio Gerencial, conforme o Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT, 2019), conforme ilustrado na figura 3.



Figura 3 – Modelagem da Seção Típica da OAE – Tipo I (Autores)

Conforme os projetos do CMG, verificou-se que a maioria das rodovias submetidas a intervenções - como recuperação, duplicação, conservação e implantação de faixas adicionais - é composta por pistas simples, predominantemente da classe I-B. Nesse contexto, o Manual de Projeto de Obras de Arte Especiais (DNER, 1996) estabelece diretrizes específicas para rodovias dessa categoria. Assim, a estrutura analisada foi escolhida de forma a refletir as características mais comuns da malha rodoviária brasileira, garantindo sua compatibilidade com os padrões adotados para esse tipo de via.

Além disso, a metodologia empregada na definição do projeto-tipo prioriza a compatibilidade técnica entre pavimentos asfálticos e de concreto, assegurando que ambos suportem o mesmo volume de tráfego. As soluções adotadas refletem as principais práticas construtivas nacionais, garantindo maior aderência à realidade da malha rodoviária brasileira.

O vão típico de 30 metros foi estabelecido para viabilizar o uso de equipamentos de içamento e lançamento de vigas, enquanto a altura das vigas foi dimensionada de acordo com o vão adotado, conforme ilustrado na figura 4.

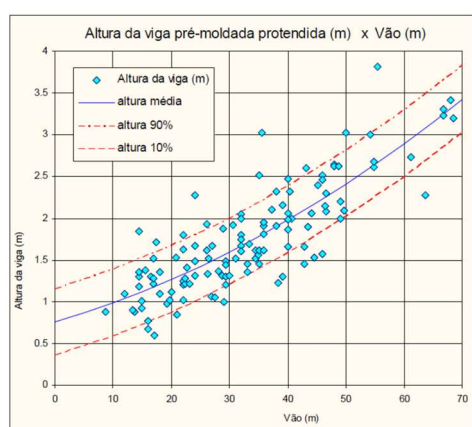


Figura 4 - Relação vão x altura viga pré-moldada protendida (Thomaz, 2002)

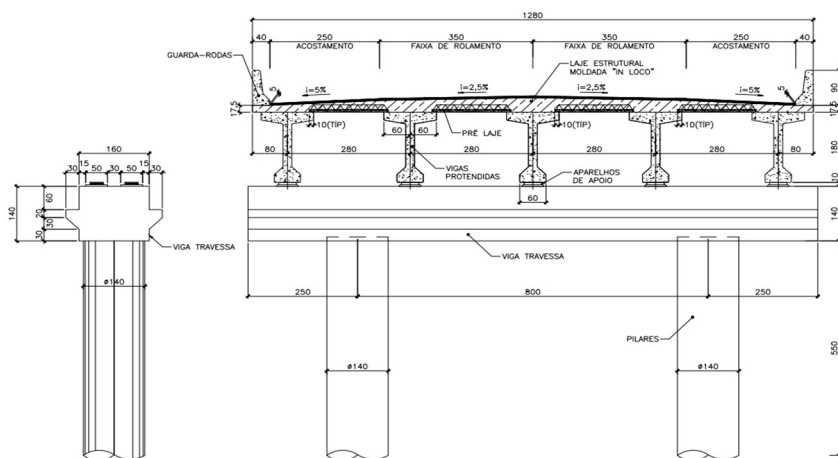


Figura 5 – Dimensionamento da seção Típica da OAE – Tipo I (DNIT, 2019)

Por este ábaco para o vão proposto, a altura das vigas protendidas deve se situar entre 1,20 e 2,00 metros, com o valor ótimo de aproximadamente 1,70 m. Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado a altura das vigas $h = 1,80$ m com a seção "I". Assim a figura 5 apresenta a seção de referência definida para o tabuleiro com vigas pré-moldadas protendidas, conforme as premissas adotadas, com as indicações das principais dimensões.

Cálculo do consumo energético e emissão de CO₂

Nesta análise em epígrafe, foram considerados os elementos estruturais da superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, conforme critério de prioridade estabelecido pela NBR 9452:2023. Ressalta-se que os elementos complementares a estrutura não foram contemplados para o estudo.

Além disso, para cada um desses elementos, foram estimados o consumo de energia e as emissões de CO₂, abrangendo três fases: (1) produção dos materiais, (2) atividade executiva dos equipamentos e (3) transporte. No caso da fabricação dos materiais, as equações 1 e 2 foram empregadas para os cálculos.

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

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

onde:

CE_{pro} representa o consumo energético do serviço na produção dos materiais [MJ/UF];

EE_{pro} representa a energia embutida na produção do material [MJ/t];

m representa a massa do material no serviço [t/UF];

ECO_2_{pro} representa a emissão de CO_2 do serviço na produção dos materiais [kg CO_2 /UF];

FCO_2_{pro} representa o fator de emissão de CO_2 na produção do material [kg CO_2 /t]

As massas dos insumos foram obtidas a partir dos consumos atribuídos as composições de custos do SICRO. Para o cálculo da energia embutida e o fator de emissão de CO_2 , específicos para cada material, foram extraídos de fontes bibliográficas nacionais, dados medidos em unidades fabris e base de dados do Brasil, com o objetivo de refletir de forma precisa a matriz energética no contexto brasileiro. A tabela 1 apresenta os dados utilizados e a referência de cada um deles.

Tabela 1 - Valores referenciais para EE_{pro} e FCO_2_{pro}

Material	Unidade	Energia embutida (EE_{pro})		Fator de emissão de CO_2 (FCO_2_{pro})	
		Valor (MJ/un)	Fonte	Valor (kg CO_2 /un)	Fonte
Areia	t	50,50	(TAVARES, 2006, p.193)	5,45	(LOBO, 2010, p.94)
Brita	t	55,30	(TAVARES, 2006, p.193)	1,90	(ROSSI, 2013, p.97)
Cimento	t	3.828,00	(TAVARES, 2006, p.193)	729,70	(VOTORANTIM, 2023)
Aço	t	30.000,00	(TAVARES, 2006, p.193)	1.721,70	(SILVA, 2013, p.71)
Ferro	t	19.235,00	(SIDAC, 2025)	1.591,50	(SIDAC, 2025)
Madeira	t	3.070,82	(SIDAC, 2025)	15,43	(SIDAC, 2025)
Diesel	l	36,26	(SILVA, 2013 p. 45)	3,13	(SILVA, 2013 p. 45)
Gasolina	l	35,00	(SILVA, 2013 p. 45)	2,66	(SILVA, 2013 p. 45)
Termoplásticos	t	95.000,00	(TAVARES, 2006, p.194)	1.100,00	(TAVARES, 2006, p.194)
Adesivo à base de resina epóxi	t	137.000,00	(SILVA, 2013, p. 75)	5.708,00	(SILVA, 2013, p. 75)

Quanto à etapa relacionada às atividades executivas dos equipamentos, o cálculo do consumo energético e das emissões de CO_2 é realizado por meio das equações 3 e 4.

$$CE_{exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times EE_{com,i} \quad (3)$$

$$ECO_2_{exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times FCO_2_{com,i} \quad (4)$$

onde:

CE_{exe} representa o consumo energético nas atividades executivas dos equipamentos [MJ/UF];

FC_{equ} representa o coeficiente de consumo do equipamento [l/kWh];

P_{equ} representa a potência do equipamento [kW];

Q_{equ} representa a quantidade do equipamento no serviço;

P_{ser} representa a produção de equipe do serviço [UF/h];

UO_{equ} representa a utilização operativa do equipamento no serviço;

EE_{com} representa a energia embutida do combustível [MJ/l];

ECO_2_{exe} representa a emissão de CO_2 nas atividades executivas dos equipamentos [kg CO_2 /UF];

FCO_2_{com} representa o fator de emissão de CO_2 do combustível [kg CO_2 /l].

A última etapa analisada refere-se à quantificação do consumo de energia e das emissões associadas às operações de transporte dos materiais, tanto do local de aquisição para o canteiro de obras quanto deste para a frente de serviço, esses valores são calculados por meio das equações 5 e 6.

$$CE_{exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{V_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \times EE_{com,i} \quad (5)$$

$$ECO_{2\text{ exe}} = \sum FC_{\text{equ},i} \times P_{\text{equ},i} \times \frac{2 \times DMT_{\text{equ},i}}{v_{\text{equ},i}} \times \frac{m_{\text{tra},i}}{Cap_{\text{equ},i}} \times FCO_{2\text{ com},i} \quad (6)$$

onde:

CE_{tra} representa o consumo energético do serviço nas operações de transporte [MJ/UF];

DMT_{equ} representa a distância média de transporte [km];

v_{equ} representa a velocidade média do equipamento no transporte [km/h];

m_{tra} representa a massa de transporte do item no serviço [t/UF];

Cap_{equ} capacidade de carga do equipamento por viagem [t];

$ECO_{2\text{ tra}}$ representa a emissão de CO_2 do serviço nas operações de transporte [kg CO_2 /UF].

Para a obtenção dos dados relativos ao coeficiente de consumo " FC_{equ} ", à potência " P_{equ} " e à capacidade " Cap_{equ} " foram extraídos no Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos (DNIT, 2024). Já em relação as velocidades médias " v_{equ} " dos equipamentos no transporte, foram adotados os valores referenciais da metodologia do SICRO para rodovias pavimentadas (60 km/h) (DNIT, 2017). Por fim, as distâncias médias de transporte " DMT_{equ} " foram atribuídas com base nas premissas da metodologia do CMG e em condições de contorno, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 – Velocidade e DMTs adotadas no estudo para transporte de insumos

Tipo do item	Item	Velocidade (km/h)	DMT (km)
Material	Aço	60	50,50
	Areia	60	50,50
	Brita	60	50,50
	Madeira	60	50,50
	Ferro	60	50,50
	Termoplástico	60	50,50
	Adesivo à base de resina epóxi	60	50,50
	Demais itens	60	50,50
	Cimento	60	114,62
Atividade auxiliar	Concreto	60	0,50

Para a obtenção dos valores absolutos do consumo energético e emissão de CO_2 é realizada a soma de todas as parcelas referente a produção dos materiais, atividades executivas dos equipamentos e operações de transporte, de acordo com as equações 7 e 8.

$$CE_{\text{tot}} = CE_{\text{pro}} + CE_{\text{exe}} + CE_{\text{tra}} \quad (7)$$

$$ECO_{2\text{ tot}} = ECO_{2\text{ pro}} + ECO_{2\text{ exe}} + ECO_{2\text{ tra}} \quad (8)$$

onde:

CE_{tot} representa o consumo energético total do serviço [MJ/UF];

$ECO_{2\text{ tot}}$ representa a emissão de CO_2 total do serviço [kg CO_2 /UF].

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no método adotado e nas condições de contorno estabelecidas, foram estimados os consumos energéticos e as emissões de CO_2 em três fases distintas: (1) na produção dos materiais, (2) nas atividades operacionais dos equipamentos e (3) nas operações de transporte. A soma dessas três etapas resultou nos valores totais de consumo energético e emissões de CO_2 . Para cada elemento, considerou-se a fabricação dos seus respectivos componentes, em conformidade com a NBR 9452 (2023) e o projeto-tipo definido pelo DNIT (2019), a saber:

- Superestrutura: Inclui todos os elementos que suportam as cargas verticais e as transferem para a mesoestrutura. No projeto-tipo foram considerados as longarinas, lajes, encontros e acabamentos.
- Mesoestrutura: Refere-se aos componentes que sustentam a superestrutura e transmitem suas cargas para a infraestrutura. No projeto-tipo foram considerados os pilares, vigas e aparelhos de apoio.
- Infraestrutura: Envolve os elementos que fazem a fundação da estrutura, transmitindo as cargas para o solo. No projeto-tipo foram considerados as estacas do tipo raiz.

Assim, a tabela 3 e a figura 6 apresentam de forma resumida os valores absolutos dos consumos energéticos e emissões de CO₂ para as estruturas supracitadas.

Tabela 3 - Valores de consumo energético e emissão de CO₂

Estrutura	Consumo energético (GJ)				Emissão de CO ₂ (tCO ₂)			
	(1)	(2)	(3)	Total	(1)	(2)	(3)	Total
Superestrutura	2.626,63	47,34	205,87	2.879,83	291,91	4,06	17,77	313,74
Mesoestrutura	719,55	9,29	62,62	791,46	84,31	0,80	5,41	90,51
Infraestrutura	79,92	64,59	5,72	150,23	6,18	5,58	0,49	12,25

(1) Produção dos materiais;

(2) Atividades operacionais dos equipamentos; e

(3) Operações de transporte.

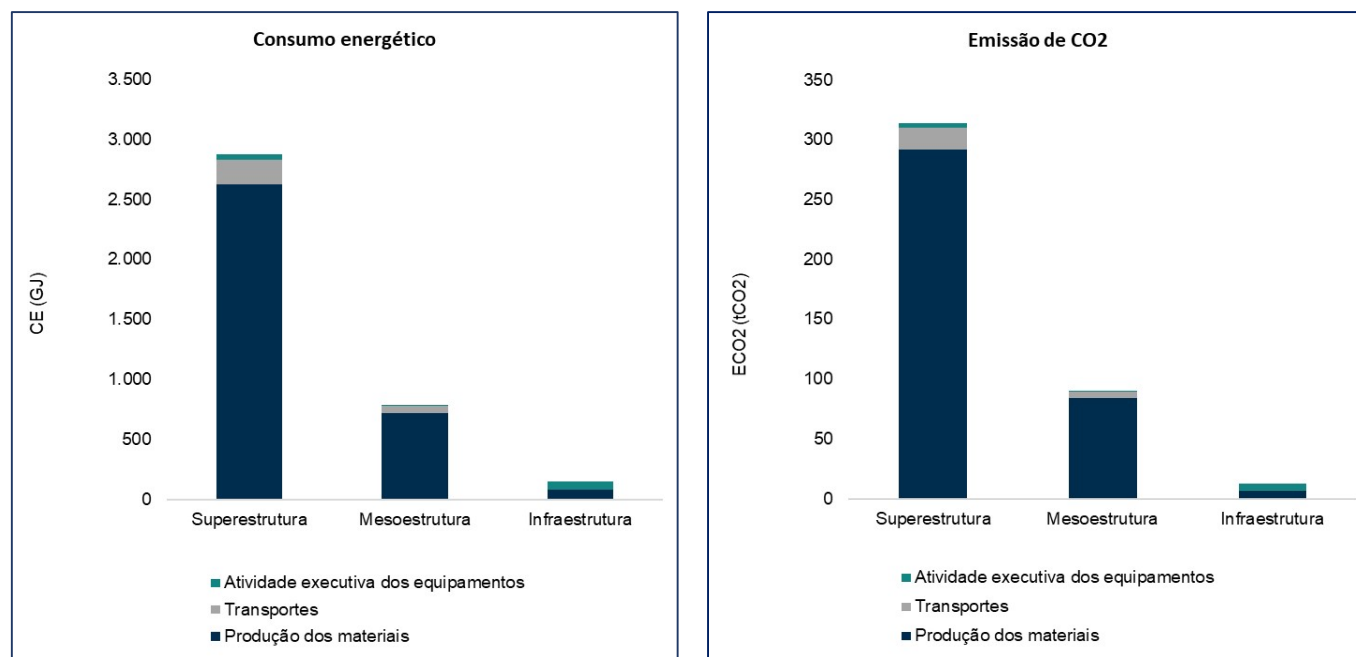


Figura 6 - Representação do consumo energético e emissão de CO₂ (Autores)

Os resultados obtidos evidenciam que a superestrutura é o elemento estrutural com maior impacto ambiental, tanto em consumo energético quanto em emissões de CO₂. Esse comportamento se deve, principalmente, à produção dos materiais, que representa a maior parcela dos impactos em todas as estruturas analisadas. Essa estrutura é responsável por 75,7% do consumo energético total (2.879,83 GJ), com 91,23% desse valor vindo da produção de materiais.

Adicionalmente, a mesoestrutura contribui com 20,0% (791,46 GJ), também predominando na produção de materiais (91%). Em contraste, a infraestrutura representa 3,7% (150,23 GJ), destacando-se pelo alto consumo na atividade executiva dos equipamentos (43,04%). Esse comportamento está diretamente associado ao uso intensivo de maquinário de grande porte, caracterizado por um alto consumo energético, especialmente em processos que demandam elevada potência, como as operações de perfuração.

Em relação às emissões de CO₂, a superestrutura totaliza 313,74 tCO₂ (70,4%), sendo 93,03% provenientes da produção de materiais. A mesoestrutura responde por 19,8% (90,51 tCO₂), seguindo a mesma tendência das emissões provenientes da produção de materiais (93,17%).

Por outro lado, a infraestrutura apresenta a menor contribuição relativa com 2,7% (12,25 tCO₂). No entanto, distingue-se pelo impacto significativo da atividade executiva dos equipamentos, com 45,63% de suas emissões originadas dessa categoria. Esse comportamento está diretamente relacionado as mesmas motivações do elevado consumo energético.

Dado que a produção de materiais se destaca como o principal fator de impacto ambiental, foi realizada uma análise de sensibilidade para identificar quais materiais exercem maior influência no consumo energético e nas emissões de CO₂. A tabela 4 e as figuras 7 e 8 detalham a contribuição de cada material nesse consumo, considerando os diferentes elementos estruturais.

Tabela 4 - Contribuição por material para parcela de produção dos materiais

Item	Consumo energético (GJ/km)			Emissão de CO ₂ (tCO ₂ /km)		
	Superestrutura	Mesoestrutura	Infraestrutura	Superestrutura	Mesoestrutura	Infraestrutura
Areia	14,08	2,92	0,31	1,52	0,31	0,03
Brita	17,61	3,47	2,09	0,99	0,23	0,07
Cimento	376,95	58,79	12,21	71,43	11,09	2,33
Aço	726,25	119,69	65,30	41,68	6,87	3,75
Ferro	1,21	0,71	0,00	0,10	0,06	0,00
Madeira	15,95	13,02	0,00	0,08	0,07	0,00
Termoplásticos	4,17	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
Adesivo à base de resina epóxi	1,64	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Total	1.157,87	198,59	79,92	115,91	18,62	6,18

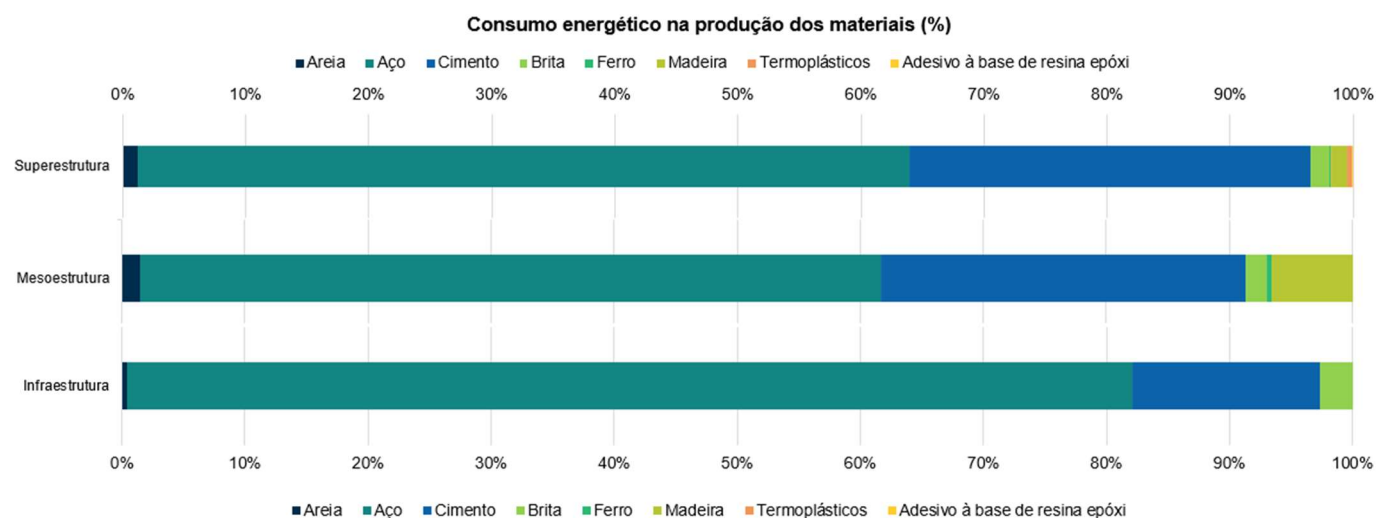


Figura 7 - Representação da contribuição do consumo energético por material para parcela de produção dos materiais (Autores)

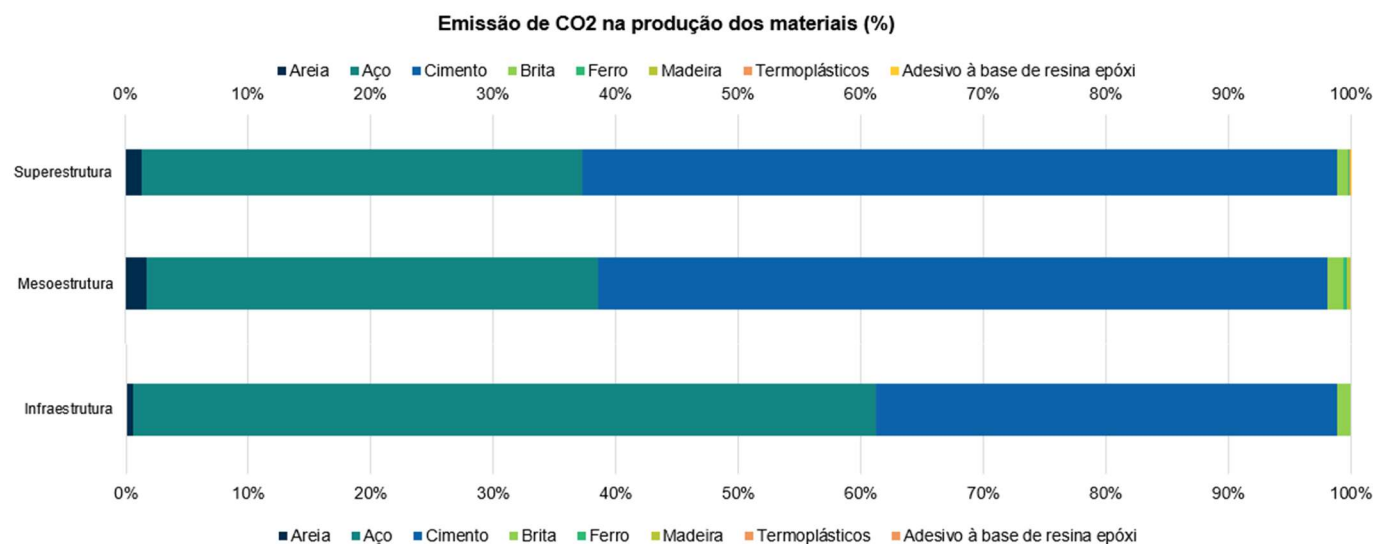


Figura 8 - Representação da contribuição da emissão de CO₂ por material para parcela de produção dos materiais (Autores)

Observa-se que o aço e o cimento são os materiais de maior impacto ambiental, concentrando 911,24 GJ/km e 447,95 GJ/km de consumo energético, além de 52,30 tCO₂/km e 84,85 tCO₂/km de emissões, respectivamente. O aço domina o consumo na superestrutura (62,7%) e na mesoestrutura (60,27%), enquanto o cimento é o maior emissor de CO₂, representando 61,64% das emissões da superestrutura e 59,6% da mesoestrutura. Materiais como brita e areia possuem impacto menor, com consumo energético moderado (23,17 GJ/km e 17,31 GJ/km) e emissões reduzidas. A infraestrutura tem o menor impacto geral, mas ainda depende desses dois materiais.

Esses resultados estão em consonância com a literatura, que aponta a produção de cimento como a principal fonte de emissão de CO₂. A maior parte das emissões ocorre durante a calcinação, um processo fundamental na transformação do calcário em clínquer, que envolve a descarbonatação do calcário a temperaturas superiores a 1200 °C. Esse processo é responsável por aproximadamente 69% das emissões totais de CO₂ associadas à produção de cimento, enquanto os combustíveis utilizados no transporte do material contribuem com os 31% restantes (RIBEIRO, PINTO e STARLING, 2015). Além disso, devido à sua produção intensiva em energia, o cimento é frequentemente destacado pelo seu alto potencial de aquecimento global (SJUNNESSON, 2005).

Entretanto, a identificação do cimento como um dos principais fatores de impacto ressalta a importância de medições precisas nas unidades fabris, bem como a necessidade de estudos e metodologias para aprimorar seu processo produtivo. Iniciativas como a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares, a utilização de combustíveis alternativos e a otimização da eficiência energética dos fornos têm sido amplamente investigadas para mitigar esses impactos. Assim, o aprimoramento das práticas industriais e o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis são fundamentais para reduzir a pegada ambiental do cimento sem comprometer seu papel essencial na engenharia civil.

A produção de aço também gera um impacto ambiental significativo, desde a extração do minério de ferro até a fabricação do aço. A extração do minério, que exige grandes áreas de terra para transporte e instalação de minas, provoca degradação dos ecossistemas, desmatamento e alterações no relevo natural, afetando diretamente a biodiversidade e o equilíbrio ecológico (MELLO; PENA; MUSCHIONI, 2023).

Por fim, é relevante discutir alguns aspectos relacionados ao método proposto neste estudo. Entre as atividades envolvidas, a obtenção das quantidades totais de materiais e equipamentos foi a que demandou maior tempo e recursos, dado que foi necessário acessar detalhadamente as composições de custos auxiliares e correlacioná-las com o serviço principal quantificado. Essa tarefa exige conhecimento técnico e familiaridade com o SICRO, a fim de garantir que as associações sejam realizadas corretamente.

Outro desafio enfrentado durante a realização do estudo foi a definição da energia embutida e do fator de emissão de CO₂ dos materiais, devido à escassez de referências oficiais que reflitam de maneira adequada a realidade brasileira. A adoção de dados internacionais, nesse caso, deve ser feita com cautela, uma vez que esses parâmetros são influenciados por fatores como as cadeias produtivas e as matrizes energéticas, que podem variar substancialmente entre os países. Dada a forte influência desses parâmetros nas análises, sua determinação requer atenção especial para evitar possíveis inconsistências nos resultados. Para o estudo em questão, foram utilizadas as referências de Teles et al., 2023; Votorantim, 2023 e SIDAC, 2025.

CONCLUSÕES

Com base no método adotado e nas condições de contorno estabelecidas, este estudo forneceu uma análise detalhada dos consumos energéticos e das emissões de CO₂ em três fases distintas do processo construtivo de uma solução tipo de OAE: (1) produção de materiais, (2) atividades operacionais dos equipamentos e (3) operações de transporte. A soma dessas etapas resultou nos valores totais de consumo energético e emissões de CO₂, permitindo uma avaliação aprofundada do impacto ambiental de cada elemento estrutural. A partir do cálculo do custo associado a cada elemento, com base na NBR 9452 (2023) e no projeto-tipo do DNIT (2019), foi possível quantificar o impacto da superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura. Embora o método tenha sido aplicado especificamente para avaliar o desempenho da OAE, ele pode ser facilmente adaptado para a análise de outros serviços dentro do SICRO.

Os resultados indicam que a superestrutura é responsável pela maior parcela do consumo energético e das emissões de CO₂, destacando-se principalmente devido ao impacto ambiental gerado pela produção de materiais, como o aço e o cimento. A mesoestrutura e a infraestrutura apresentam contribuições menores, mas ainda assim influenciam significativamente os resultados, principalmente na fase de produção dos materiais e atividade executiva dos equipamentos.

Dentre os materiais analisados, o aço e o cimento se destacaram como os maiores responsáveis pelos impactos ambientais, com o aço dominando o consumo energético na superestrutura e mesoestrutura, e o cimento sendo o principal emissor de CO₂. A infraestrutura, embora tenha apresentado o menor impacto geral, ainda depende desses materiais, que também contribuem para o consumo energético e as emissões.

O êxito do método adotado neste estudo comprova a validade e a aplicabilidade de sua abordagem para a avaliação do impacto ambiental em projetos de OAE's. No entanto, ressalta-se a necessidade de aprimorar a definição dos fatores de emissão e consumo energético, dada a escassez de dados oficiais que reflitam adequadamente a realidade brasileira. Assim, é importante destacar que os resultados obtidos são válidos

exclusivamente dentro das condições de contorno estabelecidas neste trabalho, não devendo ser generalizados para outros cenários, nem utilizados para conclusões definitivas. Isso se deve ao fato de que existem diversos outros fatores que precisam ser considerados em análises mais amplas de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Finalmente, este estudo reforça a importância de se consolidar uma base de dados nacional atualizada sobre a energia embutida e o fator de emissão de CO₂, para garantir a consistência e a aplicabilidade das análises ambientais em projetos de infraestrutura no Brasil. Além disso, estudos futuros poderiam expandir a análise para incluir o consumo de combustível e as emissões geradas durante as fases de manutenção e operação dessas estruturas, proporcionando uma visão mais completa do impacto ambiental de OAE's ao longo de seu ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INFRAESTRUTURA E DE INDÚSTRIAS DE BASE (ABDIB). Livro Azul da Infraestrutura: Uma radiografia dos projetos de infraestrutura no Brasil. Edição 2022. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9452: Projeto de pontes - Procedimentos. 2023.
- _____. NBR ISO 14040: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 30 p.
- BRASIL. Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Diário Oficial da União: seção 1 - Extra F, Brasília, DF, n. 61-F, p. 2, 1º abr. 2021.
- _____. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. 5. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020. 107 p.
- CHEN, Shilun; DUFFIELD, Colin; MIRAMINI, Saeed; RAJA, Babar Nasim Khan; ZHANG, Lihai. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. *Engineering Structures*, v. 237, p. 1-11, 2021.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de rodovias 2022. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Manual de Projeto de Obras de Arte Especiais. 1996.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos. Mês de referência: outubro de 2024. Versão 1.0. 2024.
- _____. Manual de Custos Médios Gerenciais. 2019.
- _____. Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes- Volume 01: Metodologia e Conceitos. 1ª edição. Brasília, 2017.
- _____. Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. 2004.
- LOBO, F. H. R. 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. 2010. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- MELLO, G. N. de A.; PENA, L. L. de C.; MUSCHIONI, L. M. Avaliação do impacto ambiental causado por concreto armado utilizado em pontes. Florianópolis, Mix Sustentável. 2023.
- RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. Materiais de Construção Civil. 4ª ed. Belo Horizonte: [S.l.: s.n.], 2015. 33-53 p.
- ROSSI, E. Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso. 2013. Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- SILVA, B. V. Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações. 2013. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- SJUNNESSON, J. Life Cycle Assessment of Concrete. 2005. 61 p. Tese (Thesis) — Department of Technology and Society, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Gerdagatan, 2005
- TAVARES, S. F. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. 2006. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- THACKER, S. et al. Infrastructure for climate action. Denmark, Copenhagen: UNOPS, 202
- TELES, A. A.; et al. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) de Pavimentos Asfáltico e de Concreto de Cimento Portland por meio da Quantificação do Consumo Energético e Emissão de CO₂: Análise Comparativa. 25º Enacor / 47ªRAPv, p. 822 - 833, 2023.
- THOMAZ, E.C.S. Concreto protendido pontes: Vigas pré-moldadas. Notas de aula. IME. 2002.
- ZHANG, G., LIU, Y., LIU, J., et al., 2022. Causes and statistical characteristics of bridge failures: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9 (3), 388e406.
- ZHAO, T., GOU, H., CHEN, X., ET AL., 2021. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2020. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 43 (S1), 268e279.