

Quantificação das emissões de CO₂ na PRC 280

LIDIANE OLIVEIRA BLANK - GERENTE - <https://orcid.org/0009-0001-9093-9913> (lidiane.blank@vcimentos.com) – Votorantim Cimentos

MOHAMED KASEM - DIRETOR – DER - PR

SANDRA PATRICIA ECHEVERRIA FERNANDEZ - SUPERINTENDENTE ADJUNTA – FGV IBRE

RESUMO

ESTE ESTUDO VISA COMPARAR O DESEMPENHO AMBIENTAL EM TERMOS DE EMISSÕES DE CO₂ ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO (CONCRETO) E SEMIRRÍGIDO (CAMADA DE ASFALTO COM INCREMENTO DE CIMENTO NA BASE), POR MEIO DO MÉTODO DA ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA® DESENVOLVIDO PELA FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO® PARA UM ESTUDO DA VOTORANTIM CIMENTOS, CONSIDERANDO A UNIDADE FABRIL RIO BRANCO DO SUL, PRODUTORA DE CIMENTO.

PALAVRAS-CHAVE: PAVIMENTO, CONCRETO, ECOEFICIÊNCIA, ACV, SUSTENTABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é a capacidade de algo se sustentar, conservar e permanecer ao longo das gerações. O termo, definido no Relatório Brundtland da Organização das Nações Unidas, estabeleceu que o desenvolvimento sustentável é aquele que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (Figura 1).

O contexto global, em volta da temática de mitigação dos GEE (Gases do Efeito Estufa), tem sido marcado por diversos acordos nacionais e internacionais que vêm fortalecendo o discurso do combate às mudanças do clima, definindo compromissos a serem seguidos.

As mudanças climáticas já são uma realidade e estão causando impactos generalizados em todas as partes do mundo. Secas, incêndios, inundações e eventos climáticos extremos estão cada vez mais frequentes e ameaçam o



FIGURA 1

PILARES DA SUSTENTABILIDADE

FONTE: ADAPTADO DA COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991

fornecimento de alimentos, a segurança alimentar e os meios de subsistência no planeta, uma vez que a crise climática também representa, de várias maneiras, uma crise econômica e social. De acordo com o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), a temperatura média do planeta já aumentou 1,1°C em relação à era pré-industrial e segue em uma rota de aquecimento de mais de 4°C, se falharmos

como sociedade em transformar nosso estilo de vida e trazer a ação climática para o centro das decisões políticas e empresariais.

Quando se fala em rodovias, o cenário não é diferente. Tem-se a responsabilidade de buscar alternativas mais ecoeficientes e sustentáveis, tendo em vista que se trata de um modal relevante para o Brasil, de acordo com o PNL 2035 - Plano Nacional de Logística 2035 - um instrumento de planejamento estratégico do governo brasileiro que visa traçar uma visão futura para a rede de transportes do país.

O estudo em questão buscou avaliar, apurar e mensurar, em um trecho de rodovia em operação na PRC 280, as emissões de CO₂ desde a extração da matéria-prima, passando pela construção, considerando a manutenção e uso da rodovia ao longo de 20 anos.

2. CÁLCULO DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO₂

O Método de ACV propõe uma sistemática que facilite e impulse avaliações de parâmetros relacionados à sustentabilidade para tomada de decisão entre soluções construtivas em obras de infraestrutura, utilizando



FIGURA 2

FASES DO CICLO DE VIDA DO PAVIMENTO

FONTE: TELES *et al*, 2023

dados disponíveis e já apropriados nos projetos. Envolve a compilação e quantificação de entradas e saídas do sistema de um produto, com a consequente análise de aspectos e de potenciais impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida (Figura 2), desde a aquisição das matérias-primas até a disposição final (ABNT, 2009).

O cálculo do consumo energético e emissão de CO₂ consiste na análise de ciclo de vida considerando a produção dos materiais, operações de transporte e atividade executiva dos equipamentos.

2.1 Produção de 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.

$$[1] \quad CE_{pro} = \sum EE_{pro,i} \times m_i$$

$$[2] \quad ECO_{2\ pro} = \sum FCO_{2\ pro,i} \times m_i$$

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 CO₂ do serviço na produção dos materiais [kgCO₂/UF];



FCO_{2 pro} representa o fator de emissão de CO₂ na produção do material [kgCO₂/t].

2.2 Atividade executiva 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 pelas Equações 3 e 4.

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

$$[4] \quad ECO_{2\ exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times FCO_{2\ com,i}$$

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 CO₂ nas atividades executivas dos equipamentos [kgCO₂/UF];

FCO_{2 com} representa o fator de emissão de CO₂ do combustível [kgCO₂/l].

2.3 Operações de transporte

O consumo energético e as emissões oriundas das operações de transporte necessárias para o deslocamento dos materiais são calculados por meio das equações 5 e 6:

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

$$[6] \quad ECO_{2\ tra} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{V_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \times FCO_{2\ com,i}$$

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 tra} representa a emissão de CO₂ do serviço nas operações de transporte [kgCO₂/UF].

2.4 Total

Por fim, o consumo energético e a emissão de CO₂ totais consistem na soma das parcelas de produção dos materiais, atividade executiva dos equipamentos e operações de transporte, conforme equações 7 e 8:

$$[7] \quad CE_{tot} = CE_{pro} + CE_{exe} + CE_{tra}$$

FIGURA 3

FOTOS DA PRC 280

FONTE: FOTO CEDIDA POR TRIPOLONI, 2024

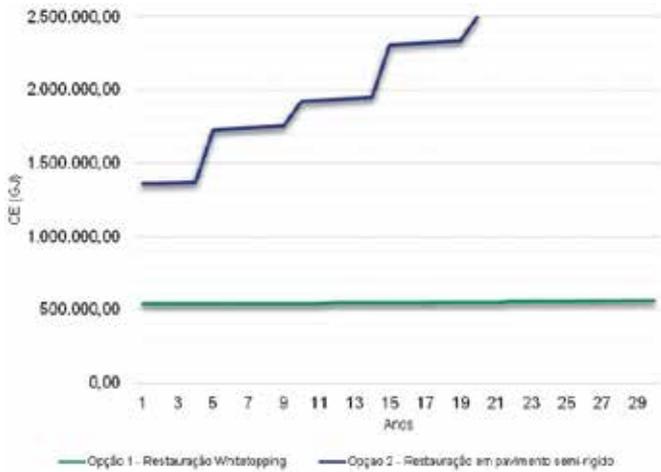


GRÁFICO 1

CONSUMO ENERGÉTICO EM 20 ANOS

FONTE: AUTORES

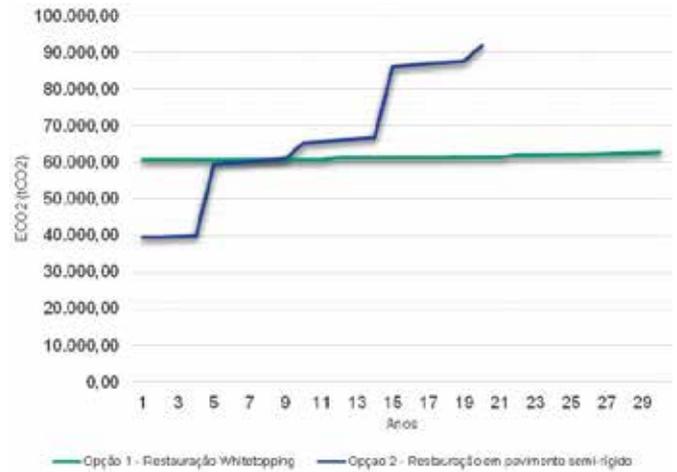


GRÁFICO 2

EMIÇÃO DE CO₂ EM 20 ANOS

FONTE: AUTORES

[8]

$$ECO_2_{tot} = ECO_2_{pro} + ECO_2_{exe} + ECO_2_{tra}$$

Onde:

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

ECO_{2 tot} representa a emissão de CO₂ total do serviço [kgCO₂/UF].

Estes conceitos foram aplicados na obra de infraestrutura rodoviária de restauração de Whitetopping na rodovia PRC 280 (1º Lote), entregue em 2023, ilustrado na Figura 3.

3. DESENVOLVIMENTO

Com base no estudo desenvolvido pela Fundação Espaço ECO® e pesquisa desenvolvida pelo Centre for Surface Transportation Technology (CSTT) e National Research Council of Canada (NRC), foi possível estruturar uma correlação importante quanto à sustentabilidade de pavimentos, considerando a análise de Ciclo de Vida da solução de engenharia adotada para o pavimento da rodovia.

Em conjunto com a FGV IBRE, adotando-se a metodologia de ACV e considerando-se como dados

de entrada os serviços e dados do SI-CRO, (Sistema de Custos Referenciais de Obras), uma ferramenta do DNIT que define e calcula os custos de insumos e serviços para obras de infraestrutura de transportes no Brasil, e que considera fatores regionais, como chuvas (FIC) e tráfego (FIT), para ajustar a produtividade e o custo dos serviços, e parâmetros de transporte (DMT e velocidade dos equipamentos transporta-

dores), foi possível calcular as emissões reais do trecho em questão (energia embutida e fator de emissão).

4. CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, foi possível avaliar tanto o consumo energético quanto as emissões de CO₂ para um trecho da PRC 280.

Os Gráficos 1 e 2 apresentam, respectivamente, o consumo energético e as emissões de CO₂ ao longo de 20 anos de vida útil do projeto, comparando duas soluções distintas. O Gráfico 1 revela que a Opção 2, representada pela restauração em pavimento semirrígido, apresenta um consumo energético significativamente maior, especialmente a partir do 10º ano, com elevações consideráveis. Em contraste, a Opção 1, referente à restauração em pavimento Whitetopping, mantém um consumo energético constante e consideravelmente inferior ao da Opção 2.

No que diz respeito às emissões de CO₂, ilustradas no Gráfico 2, observa-se que a Opção 2 registra um aumento expressivo nas emissões após o 10º ano,

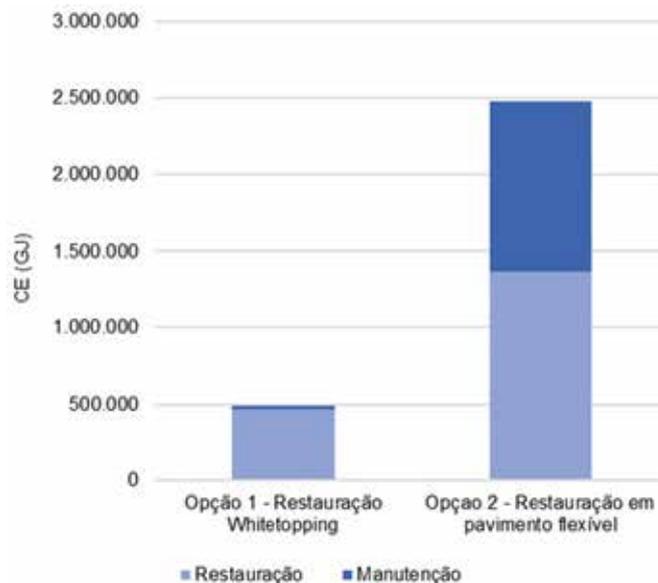


FIGURA 4

CONSUMO ENERGÉTICO

FONTE: AUTORES

TABELA 1
EMIÇÃO DE CO₂

Opção	Consumo energético (GJ)			Emissão de CO ₂ (tCO ₂)		
	Restauração	Manutenção	Total	Restauração	Manutenção	Total
Opção 1 – Restauração Whitetopping	541.877,38	22.553,33	564.430,71	60.552,43	2.174,59	62.727,01
Opção 2 – Restauração em pavimento semi-rígido	1.359.120,66	1.114.118,17	2.473.238,83	39.647,36	49.690,75	89.338,10

FONTE: AUTORES

com incrementos mais acentuados ao longo do tempo. Por outro lado, a Opção 1 apresenta estabilidade nas emissões, permanecendo em um nível consistentemente inferior em relação à Opção 2, o que sugere uma alternativa mais sustentável, com menor impacto ambiental.

De forma geral, a análise indica que a Opção 1 oferece uma abordagem mais ecológica e mais alinhada à sustentabilidade a longo prazo.

A Tabela 1 e a Figura 4 comparam as emissões de carbono ao longo da vida útil de dois tipos de restauração: a Opção 1, *Whitetopping*, e a Opção 2, pavimento flexível, incluindo também os componentes de manutenção. Verifica-se que as emissões totais de CO₂ da Opção 2 são significativamente maiores que as da Opção 1. Isso ocorre devido ao peso maior das emissões relacionadas à fase de manutenção na solução de pavimento flexível, que se evidencia no gráfico pelo volume expressivo de emissões nesta fase.

Por outro lado, a Opção 1 apresenta uma quantidade consideravelmente menor de emissões de CO₂, indicando



FIGURA 5

COMPARATIVO DE CONSUMO ENERGÉTICO & EMISSÕES DE CO₂

FONTE: AUTORES

uma pegada de carbono menor ao longo do ciclo de vida.

De forma prática, as análises e apurações reais realizadas para este trecho da PRC 280 verificaram que, considerando a análise de ciclo de vida previamente definida e as mesmas condições de contorno, o consumo energético foi 4,4 vezes maior e a emissão de CO₂ 40% superior para o pavimento flexível, como ilustrado na Figura 5.

Sendo assim, pode-se observar que, além de necessário, é também possível inserir, nas análises de viabilidade técnico-econômica, a ecoeficiência mediante a quantificação das emissões de CO₂.

Cabe destacar que a durabilidade do pavimento rodoviário bem como sua performance são fundamentais para o atingimento dos resultados. E, por este motivo, adicionalmente à quantificação das emissões de CO₂, foi também possível aferir a performance deste trecho de rodovia via tecnologia inovadora, FALKORR, apurando os parâmetros de desempenho IRI, transferência de cargas entre placas, ICP.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todos os profissionais do DER PR, FGV IBRE e Votorantim Cimentos que participaram do estudo, empenhando e envidando esforços para que fosse possível termos a primeira Rodovia do País com as emissões de CO₂ mensuradas e aferidas dentro de uma metodologia aplicável e principalmente replicável. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- [3] COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Nosso futuro comum. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.
- [4] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2024 - ES - Pavimentação – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Brasília, 2024.
- [5] 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. 25ª Enacor/47ª RAPv, p. 822 - 833, 2023.
- [6] THACKER, A.; et al. Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts. New York: McKinsey Global Institute, 2021. VOTORANTIM CIMENTOS & FUNDAÇÃO ESPAÇO ECO. Análise de ecoeficiência da construção e manutenção de pavimentos; São Paulo, 2016.