



Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada a Pavimentos Rodoviários: Abordagens, Avanços e Desafios para o Contexto Brasileiro

Life Cycle Assessment Applied to Road Pavements: Approaches, Advances, and Challenges in the Brazilian Context

Alex Gomes Pereira

Hualisson Souza Domingos

Clebio Lima Ribeiro

Resumo: Este trabalho apresenta uma revisão da literatura acerca da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em pavimentos rodoviários, discutindo sua evolução conceitual, seus métodos e sua relevância no contexto atual da sustentabilidade em infraestrutura de transportes. Inicialmente, é traçado um panorama da malha rodoviária brasileira e das projeções futuras para o setor, evidenciando a necessidade de incorporar critérios ambientais às decisões de projeto, construção e manutenção de pavimentos. Em seguida, o estudo aborda o desenvolvimento da ACV aplicada ao pavimento, detalhando suas quatro etapas estruturantes — definição de objetivo e escopo, inventário, avaliação de impactos e interpretação — e destacando como elas têm sido adaptadas às particularidades das obras rodoviárias. Por fim, são discutidos os avanços já consolidados, bem como as limitações ainda presentes na literatura e na prática, indicando oportunidades de aprofundamento para pesquisas que visem o aperfeiçoamento metodológico e a ampliação do uso da ACV no setor rodoviário brasileiro.

Palavras-chave: pavimentação; sustentabilidade; avaliação do ciclo de vida; infraestrutura de transportes.

Abstract: This paper presents a literature review on the application of Life Cycle Assessment (LCA) in road pavements, discussing its conceptual evolution, methodological approaches, and relevance within the current context of sustainability in transportation infrastructure. The study begins by outlining the Brazilian road network and future projections for the sector, highlighting the need to incorporate environmental criteria into pavement design, construction, and maintenance decisions. Subsequently, the development of pavement-specific LCA is addressed, detailing its four foundational phases — goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment, and interpretation — and emphasizing how these have been adapted to the specificities of road construction projects. Finally, the paper discusses established advancements as well as existing limitations in both literature and practice, identifying opportunities for further research aimed at methodological refinement and broader adoption of LCA in the Brazilian road sector.

Keywords: pavement; sustainability; life cycle assessment; transportation infrastructure.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, observa-se um movimento crescente de empresas, governos e instituições internacionais em direção a práticas produtivas que incorporem princípios ambientais, sociais e econômicos de maneira integrada. A noção de sustentabilidade, embora não seja recente, passou a ser tratada de forma mais objetiva e mensurável, uma vez que decisões que antes se apoiavam em interpretações gerais do tema vêm sendo substituídas por métodos que buscam quantificar impactos de modo sistemático. Assim, esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento de ferramentas capazes de medir e orientar ações sustentáveis de maneira estruturada.

Neste contexto, destaca-se o papel da construção civil. O setor é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico, mas também figura entre os que mais consomem energia e recursos naturais, além de gerar grande volume de resíduos. Tal cenário evidencia a necessidade urgente de estratégias que reduzam os impactos ambientais desse segmento.

O ramo de infraestrutura de transportes, que sustenta a dinâmica econômica contemporânea, possui relevância ainda maior quando se observa a predominância do modal rodoviário. No Brasil, projeções indicam que, em 2035, aproximadamente 189 milhões de toneladas de CO₂ equivalente deverão ser emitidas pelo transporte de cargas, sendo cerca de 80% provenientes das rodovias. Isso se deve ao volume expressivo de insumos extraídos, processados e transportados para a construção e manutenção de pavimentos, somado ao fato de que, ao longo da vida útil dessas estruturas, novas intervenções são necessárias, gerando sucessivos impactos ambientais.

Dante desse quadro, cresce o interesse científico em tecnologias e metodologias capazes de tornar os pavimentos mais sustentáveis. A literatura recente, por exemplo, destaca avanços relacionados ao uso de materiais reciclados, reaproveitamento de resíduos industriais e redução do consumo de ligantes asfálticos ou cimentícios (Chen e Wang, 2018). Paralelamente, estudos têm buscado compreender de forma ampliada os efeitos ambientais envolvidos nas etapas de construção, operação, manutenção e reabilitação de pavimentos, estimulando a adoção da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta metodológica de referência (Shi, Mukhopadhyay *et al.*, 2019; Zheng, Easa *et al.*, 2019).

No cenário internacional, políticas públicas também têm sido formuladas com o intuito de apoiar decisões baseadas em análises ambientais. A Federal Highway Administration (FHWA), agência federal norte-americana, mantém um programa de incentivo à sustentabilidade que financia diversos projetos voltados à redução de emissões ao longo do ciclo de vida de pavimentos. Atualmente, recursos da ordem de 7,1 milhões de dólares estão distribuídos entre 27 departamentos rodoviários estaduais, todos orientados pelos princípios estabelecidos nas normas ISO 14040 e ISO 14044, que estruturam a ACV como método de avaliação (FHWA, 2023). Além disso, o governo dos Estados Unidos estima investimentos de aproximadamente 6,4 trilhões de dólares até 2026 destinados ao setor de infraestrutura, com o

compromisso explícito de diminuir emissões de CO₂ e modernizar sistemas viários.

Assim, torna-se evidente que a sustentabilidade no setor rodoviário não é apenas um objetivo conceitual, mas um campo técnico em aceleração, no qual metodologias como a ACV assumem papel estratégico ao orientar decisões fundamentadas em evidências.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, entendida como o processo de identificação, seleção e síntese crítica de estudos científicos previamente publicados sobre um determinado tema. Dessa forma, este trabalho fundamenta-se em conhecimentos consolidados na produção acadêmica, buscando analisar e comparar abordagens existentes relacionadas à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada a pavimentos rodoviários.

Para orientar a estrutura analítica, adotou-se a abordagem metodológica denominada Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC), proposta por Mariano e Rocha (2017), que permite organizar e interpretar o conteúdo bibliográfico a partir da identificação de padrões, lacunas e tendências de pesquisa.

A busca por referências foi conduzida principalmente na base de dados Web of Science, utilizando as palavras-chave *life cycle assessment*, *LCA* e *pavement*, considerando o período de 2010 a 2023. Além disso, documentos técnicos e relatórios institucionais disponíveis em portais de órgãos públicos e entidades de pesquisa foram consultados para complementar a análise.

No levantamento inicial, foram identificadas aproximadamente 312 publicações relacionadas ao tema. Contudo, após a aplicação de critérios de refinamento — como eliminação de estudos duplicados, exclusão de artigos que não tratavam diretamente da aplicação da ACV em pavimentos e filtragem por aderência temática — a amostra final foi composta por 41 artigos, considerados mais pertinentes ao objetivo deste estudo.

A análise desses trabalhos foi orientada por dois eixos estruturantes: a) o processo histórico de incorporação da ACV ao setor de pavimentação rodoviária;

b) a aplicação prática da ACV conforme as quatro fases estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044: (i) definição do objetivo e escopo; (ii) elaboração do inventário do ciclo de vida; (iii) avaliação dos impactos ambientais; e (iv) interpretação dos resultados.

Essa estrutura permitiu avaliar o estado atual da produção científica, compreender avanços e limitações das pesquisas existentes e identificar perspectivas para a ampliação da ACV no planejamento e gestão de pavimentos no contexto brasileiro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão evidencia que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) emerge no final dos anos 1960 como resposta à necessidade de mensurar emissões e fluxos de matéria e energia em sistemas produtivos, inicialmente voltada a bens de consumo, e só mais tarde transposta para a infraestrutura viária. Essa transição, consolidada a partir do fim dos anos 1990, marca o ingresso de pavimentos asfálticos e de concreto no escopo da ACV, com crescimento gradual de estudos que cobrem extração de matérias-primas, produção, construção, uso, manutenção/reabilitação e fim de vida.

A literatura de referência (Guinée, 2012; Santero, Masanet & Horvath, 2011; Inyim *et al.*, 2016; Hu, Shu & Huang, 2019; Ghalandari, Hasheminejad *et al.*, 2021; Liu, Balieu & Kringos, 2022; Babashamsi, Yusoff *et al.*, 2016; Azarijafari, Yahia & Ben Amor, 2016) converge para a maturidade conceitual do método e confirma sua adequação ao contexto de pavimentos, embora ressalte lacunas de padronização e de dados regionais. No recorte analisado, prevalecem objetivos de pesquisa comparando pavimentos rígidos e flexíveis (Jullien, Dauvergne & Cerezo, 2014; Kucukvar & Tatari, 2012) e investigações sobre materiais alternativos e reciclados — como RAP e subprodutos industriais — com foco em emissões e energia incorporada (Chen & Wang, 2018; Shi, Mukhopadhyay *et al.*, 2019); aparecem também estudos com integração ambiental-econômica ou tríplice (ambiental, econômica e social), ainda minoritários (Choi, Lee & Mao, 2016; Zheng, Easa *et al.*, 2019).

Observam-se variações amplas na definição de escopo e fronteiras (cradle-to-gate a cradle-to-grave) e nos horizontes de análise (por exemplo, 27 versus 100 anos), o que, por si só, limita comparações diretas e exige leitura crítica dos resultados.

Quanto à unidade funcional, o padrão mais recorrente permanece sendo a extensão de via (km-faixa) para a fase de uso, mas há nítido movimento em direção a unidades funcionais baseadas em desempenho — rugosidade (IRI), textura e deflexão — por capturarem a influência da superfície de rolamento no consumo de combustível e, portanto, nas emissões operacionais (Loijos, Santero & Ochsendorf, 2013; Bryce *et al.*, 2014; Santos, Ferreira *et al.*, 2018; Xu, Akbarian *et al.*, 2019). Essa mudança é decisiva do ponto de vista interpretativo: soluções que parecem “mais limpas” na construção podem se revelar ambientalmente mais onerosas na operação se degradarem a qualidade funcional e, com isso, elevarem o consumo energético da frota. O conjunto de ferramentas identificado inclui softwares de ACV generalistas, com destaque ao SimaPro, e selos/ratings de sustentabilidade viária como CEEQUAL (Reino Unido), Greenroads/INVEST (EUA), GreenPave (Canadá) e BE2ST/PaLATE, úteis em avaliações multicritério; contudo, a integração BIM-ACV aparece como lacuna persistente na amostra, apesar do potencial de conectar quantitativos, logística, equipamentos e cronogramas a inventários de ciclo de vida (Butt, Mirzadeh *et al.*, 2014; Mattinzioli, Sol-Sánchez *et al.*, 2020).

Na etapa de inventário (ICV), os dados para produção e construção tendem a ser colhidos em bases setoriais consolidadas (p.ex., Ecoinvent, PCA, AASHTO), ao

passo que uso e manutenção dependem mais de modelos teóricos (Greet, Moves, EMFAC, COPERT, VTI, U.S. CIA, Lagerblad), vulneráveis a incertezas de tráfego, clima, composição veicular e desempenho funcional. Estudos de sensibilidade indicam que a simples troca de base de dados pode alterar de modo substantivo as conclusões — Wang, Lee *et al.* (2012), por exemplo, demonstram diferença relevante entre bases para energia incorporada e emissões, e Santero, Masanet & Horvath (2011) mostram dispersão nos valores de intensidade energética do cimento reportados por diferentes autores, reforçando a necessidade de seleção criteriosa e regionalização de fatores.

Do ponto de vista de categorias e métodos de impacto (AICV), a literatura privilegia Aquecimento Global (CO_2e), seguida por acidificação e eutrofização, com emprego frequente do TRACI em estudos na América do Norte e presença de métodos europeus (CML, ILCD, EF, EN 15804+A2, Eco-points 2021) e globais (ReCiPe 2016). A escolha metodológica afeta a interpretação: ReCiPe tende a atribuir maior peso às mudanças climáticas, enquanto o Eco-points 2021 incorpora dimensões como uso da água e resíduos radioativos, modificando a importância relativa das categorias e, por consequência, o ranking de alternativas (FOEN, 2021; SIMAPRO, 2020; CEN, 2016).

Em termos de interpretação e incerteza, parte dos estudos recorre a simulações de Monte Carlo e análises de sensibilidade (Kucukvar & Tatari, 2012; Xu, Akbarian *et al.*, 2019), mas permanece a heterogeneidade na forma de consolidar resultados e emitir recomendações, muito em função da diversidade de objetivos, dados e fronteiras. No Brasil, a revisão realça oportunidades para reduzir incertezas por meio do uso sistemático de bases públicas: o PNMRR/DNIT, com séries históricas de condição funcional e estrutural, é naturalmente apto a parametrizar cenários de deterioração e programas de manutenção, aproximando o inventário das condições de operação reais; adicionalmente, composições de custos e consumos de insumos/ equipamentos do DNIT podem servir como proxy transparente para energia e emissões na fase construtiva, com rastreabilidade orçamentária.

A discussão resultante aponta um descompasso entre maturidade metodológica e adoção institucional. Embora a ACV esteja ancorada em normas ISO (NBR ISO 14040/14044) e conte com ferramental robusto, sua incorporação aos processos decisórios do setor público brasileiro ainda é restrita; faltam diretrizes específicas para selecionar unidade funcional adequada ao objetivo (geométrica x desempenho), definir fronteiras mínimas por tipo de estudo (por exemplo, obrigatoriedade de incluir a fase de uso em análises comparativas) e prescrever métodos de impacto e protocolos de incerteza, de modo a garantir comparabilidade entre projetos.

Experiências internacionais, como as iniciativas de sustentabilidade da FHWA com financiamento dedicado a projetos de redução de emissões ao longo do ciclo de vida, sugerem que governança, padronização e incentivos aceleram a adoção prática e ampliam o impacto das avaliações (FHWA, 2023).

A partir desses resultados, três direções se impõem para o contexto nacional: (i) instituir diretrizes do DNIT que exijam ACV em estudos de viabilidade e projetos

executivos, empregando unidade funcional de desempenho quando a fase de uso for determinante; (ii) construir um Banco Nacional de Inventário com fatores regionalizados para materiais e processos críticos (CAP, cimento, agregados, aço, eletricidade, transportes, equipamentos), articulado a um programa de EPDs setoriais; e (iii) padronizar métodos de impacto e análises de incerteza, com cenários de sensibilidade mandatórios, assegurando que recomendações técnicas e contratuais sejam comparáveis entre corredores, lotes e programas.

Ao integrar essas frentes com o ecossistema BIM e com bases públicas existentes, a ACV deixa de ser apenas um exercício acadêmico e se converte em instrumento operativo para orientar escolhas de projeto, estratégias de manutenção e políticas de descarbonização no setor rodoviário brasileiro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão realizada permitiu identificar que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada a pavimentos rodoviários constitui um método consolidado no plano conceitual e normativo, especialmente após sua incorporação pelas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044. Entretanto, constatou-se que o avanço teórico ainda não se traduz, de forma consistente, em aplicação sistemática na gestão e no planejamento da infraestrutura rodoviária, sobretudo no contexto brasileiro. Persistem desafios associados à padronização de unidades funcionais, à definição das fronteiras de análise e, principalmente, à disponibilidade e qualidade de dados para as etapas de inventário, especialmente nas fases de operação e manutenção, que são decisivas no desempenho ambiental de longo prazo.

A literatura converge para a compreensão de que unidades funcionais baseadas em desempenho — como indicadores de rugosidade, deflexão e textura — oferecem maior capacidade de capturar externalidades do uso do pavimento, em especial o consumo energético dos veículos e as emissões relacionadas. Contudo, seu emprego ainda é limitado, favorecendo comparações simplificadas que ignoram interações dinâmicas relevantes entre pavimento e tráfego.

Do ponto de vista prático, destacou-se a necessidade de desenvolvimento e consolidação de bancos de dados regionais para materiais, processos construtivos e condições operacionais, uma vez que a utilização de fatores estrangeiros, sem calibração, compromete a representatividade dos resultados. No caso brasileiro, iniciativas como o PNMRR e as composições de custos do DNIT apresentam potencial para se tornarem referenciais estruturantes na construção de inventários nacionais.

Por fim, recomenda-se o estabelecimento de diretrizes normativas específicas para aplicação da ACV em projetos rodoviários, com padronização mínima de: (i) unidades funcionais; (ii) métodos de avaliação de impacto; e (iii) tratamento da incerteza. A incorporação progressiva da ACV em estudos de viabilidade, contratação e manutenção, associada ao uso de modelos digitais (BIM), tende a favorecer decisões mais sustentáveis, reduzir emissões ao longo do ciclo de vida dos pavimentos e qualificar a formulação de políticas públicas no setor de transportes.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14040: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro, 2014.
- Azarijafari, H.; Yahia, A.; Ben Amor, M. (2016). *Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities*. Journal of Cleaner Production.
- Babashamsi, P.; Yusoff, N. I. M.; et al. (2016). *Sustainable pavement materials: A review*. Construction and Building Materials.
- Bryce, J.; Katicha, S.; et al. (2014). *Functional unit considerations in pavement LCA*. Transportation Research Record.
- Butt, A.; Mirzadeh, I.; et al. (2014). *Framework for pavement sustainability assessment tools*. International Journal of Pavement Engineering.
- CEN – European Committee for Standardization. (2016). *EN 15804 + A2: Sustainability of construction works – Environmental product declarations*.
- Chen, X.; Wang, H. (2018). *Life cycle energy and emissions of recycled asphalt pavements*. Resources, Conservation and Recycling.
- Choi, K.; Lee, H.; Mao, X. (2016). *Multi-criteria sustainability assessment in road infrastructure*. Sustainability.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2018). *Plano Nacional de Manutenção e Restauração Rodoviária – PNMRR*.
- FHWA – Federal Highway Administration. (2023). *Sustainability Program and Climate Challenge Initiatives*. U.S. Department of Transportation.
- FOEN – Federal Office for the Environment. (2021). *Methodological Principles for Eco-points 2021*. Switzerland.
- Ghalandari, M.; Hasheminejad, N.; et al. (2021). *Systematic review of pavement LCA frameworks*. Journal of Environmental Management.
- Guinée, J. (2012). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide*. Springer.
- Hu, Z.; Shu, X.; Huang, B. (2019). *Advances in pavement LCAs*. Journal of Cleaner Production.
- Inyim, P.; Pereyra, J.; et al. (2016). *Framework for pavement environmental evaluation*. Journal of Cleaner Production.

- Jullien, A.; Dauvergne, M.; Cerezo, V. (2014). *LCA comparison of rigid and flexible pavements*. Resources, Conservation and Recycling.
- Kucukvar, M.; Tatari, O. (2012). *Environmental sustainability analysis of highway infrastructures*. Energy Policy.
- Loijos, A.; Santero, N.; Ochsendorf, J. (2013). *Pavement performance and vehicle energy*. Transportation Research Part D.
- Liu, Q.; Balieu, R.; Kringos, N. (2022). *Critical review of pavement LCA models*. Resources, Conservation and Recycling.
- Mattinzioli, T.; Sol-Sánchez, M.; et al. (2020). *Road sustainability assessment tools*. Sustainable Cities and Society.
- Santero, N.; Masanet, E.; Horvath, A. (2011). *Life-cycle assessment of pavements: A review*. Journal of Infrastructure Systems.
- Santos, J.; Ferreira, A.; Flintsch, G. (2018). *Pavement performance and combined environmental-economic impacts*. Transportation Research Part D.
- Shi, X.; Mukhopadhyay, A.; et al. (2019). *Incorporating recycled materials in concrete pavements: an LCA approach*. Journal of Cleaner Production.
- Wang, T.; Lee, I.; et al. (2012). *Sensitivity of pavement LCAs to background databases*. International Journal of Life Cycle Assessment.
- Xu, B.; Akbarian, M.; et al. (2019). *Highway surface condition and vehicle emissions: LCA implications*. Environmental Science & Technology.
- Zheng, Q.; Easa, S.; et al. (2019). *Multi-criteria environmental and social evaluation of pavement alternatives*. Journal of Cleaner Production.