

7º CONRESOL

7º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

ANÁLISE ABRANGENTE DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.I-019>

Daniela Kunz (*), Jaqueline Tomasini Orth, Priscila Reis

Faculdade Uniguaçu, dani-kunz@hotmail.com

RESUMO

A pavimentação asfáltica representa uma fonte significativa de emissão de gases de efeito estufa (GEE). A quantificação dessas emissões ao longo do processo produtivo é crucial para explorar alternativas mais sustentáveis para o meio ambiente. A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem obtido aceitação global na indústria rodoviária como meio de medir e avaliar o desempenho ambiental dos materiais e processos aplicados ao longo da vida útil do pavimento. Essa avaliação, focada na identificação da intensidade de emissão de GEE, comumente referida como "pegada de carbono", proporciona uma análise abrangente dos impactos ambientais associados. Dessa forma, este estudo examina o estado atual da ACV na pavimentação asfáltica através de uma Revisão Sistemática da Literatura. A seleção criteriosa de 39 artigos nos bancos de dados Scopus e Web Of Science permitiu uma análise comparativa dos diversos parâmetros adotados para a caracterização da ACV de pavimentos asfálticos. Os resultados mostram que, embora haja um aumento na preocupação da comunidade científica em relação às emissões de GEE, as publicações nessa área são recentes. Além disso, seria interessante padronizar a unidade funcional para facilitar análises comparativas mais eficazes entre diferentes estudos. Ainda, destaca-se a escassez de publicações nacionais específicas sobre pavimentação asfáltica, o que dificulta a utilização eficiente de ferramentas internacionais disponíveis, dada a ausência de bancos de dados adaptados às condições das rodovias, materiais e maquinários brasileiros. Este cenário ressalta a necessidade de um maior enfoque e investimento em pesquisa nessa área a nível nacional.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento, Avaliação do ciclo de vida, Gases de efeito estufa.

ABSTRACT

Asphalt pavement represents a significant source of greenhouse gas emissions (GHG). Quantifying these emissions throughout the production process is crucial for exploring more environmentally sustainable alternatives. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology has gained global acceptance in the road industry as a means of measuring and assessing the environmental performance of materials and processes applied throughout the pavement's lifespan. This assessment, focused on identifying GHG emission intensity commonly referred to as "carbon footprint," provides a comprehensive analysis of associated environmental impacts. Thus, this study examines the current state of LCA in asphalt pavement through a Systematic Literature Review. The careful selection of 39 articles from the Scopus and Web of Science databases allowed for a comparative analysis of various parameters adopted for characterizing LCA in asphalt pavements. The results show that, although there is an increasing concern in the scientific community regarding GHG emissions, publications in this area are recent. Additionally, standardizing the functional unit would be beneficial to facilitate more effective comparative analyses between different studies. Furthermore, there is a scarcity of specific national publications on asphalt pavement, hindering the efficient use of available international tools due to the absence of databases adapted to Brazilian highway conditions, materials, and machinery. This scenario emphasizes the need for a greater focus and investment in research in this area at the national level.

KEY WORDS: Pavement, Life Cycle Assessment, Greenhouse Gases.

INTRODUÇÃO

Diversas empresas e organizações globais estão atualmente envolvidas na promoção de diretrizes que fomentam práticas e negócios orientados para a sustentabilidade. Os principais objetivos dessas iniciativas visam desenvolver estratégias que integrem aspectos sociais, econômicos e ambientais. Embora o conceito de sustentabilidade não seja novo, em muitos casos, decisões são influenciadas por seus princípios, mesmo que de maneira indireta. Nos últimos anos, no entanto, esforços significativos têm sido empreendidos para identificar e quantificar de maneira mais sistemática e organizada os impactos da sustentabilidade (HOFFMAN, et al., 1997).

O reconhecimento da importância da preservação ambiental e das repercussões ambientais relacionadas aos produtos, tanto em sua fabricação quanto em seu consumo, tem gerado um interesse crescente no desenvolvimento de métodos



para uma compreensão mais aprofundada e eficaz desses impactos. Uma das abordagens que vem sendo estudada com esse propósito é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que envolve a coleta e análise de dados referentes às entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de sua vida útil (NBR ISO 14040, 2001).

A indústria da construção civil desempenha um papel central nas economias de vários países. No entanto, ela também é responsável por um considerável consumo de recursos naturais e energia, além da geração significativa de resíduos. Em 2021, o setor de construção foi responsável por cerca de 30% do consumo global de energia, abrangendo eletricidade, gases, combustíveis líquidos e sólidos. Adicionalmente, o setor contribuiu com aproximadamente 27% das emissões globais de CO₂ (ONU, 2022). Portanto, é imprescindível que as empresas desse setor desenvolvam estratégias voltadas para a redução desses impactos em todo o ciclo de vida de seus produtos. Entre as diversas áreas abrangidas pela construção civil, destaca-se a construção de estradas e rodovias, dado que representa o principal modal de transporte utilizado no Brasil.

A construção de pavimentos implica em um impacto ambiental que perpassa toda a sua cadeia de produção. Esse impacto deve ser minuciosamente considerado e analisado, abrangendo desde o transporte dos materiais utilizados na construção até a produção de ligantes asfálticos, cimento Portland e materiais pétreos, todos associados a significativos consumos energéticos. Dentro desse contexto, devido à sua longa vida útil e métodos construtivos, os pavimentos emergem como fontes contínuas de emissões de GEE ao longo de seu ciclo de vida. Desde a extração e processamento da matéria-prima até as fases de construção, manutenção, recuperação e fim de vida do pavimento, as emissões persistem (MULLER et al., 2013). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), baseada na norma ISO 14040 (2006), oferece uma abordagem holística para examinar os potenciais impactos ambientais ao longo da vida de um produto, processo ou serviço.

No Brasil, esses fatores ambientais não são atualmente levados em conta na tomada de decisões sobre a escolha da melhor alternativa de pavimentação. Nesse contexto, apenas os aspectos técnicos e econômicos são considerados, ao contrário de países como Suíça, Inglaterra, França, Estados Unidos e Portugal, que já adotam a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para identificar impactos e auxiliar na decisão da alternativa mais sustentável de pavimentação (SAVIETTO, 2017).

Diante desse cenário, o presente estudo busca compreender o estado da arte da aplicação da ACV na pavimentação asfáltica, com foco nas emissões de GEE, mediante uma análise crítica de artigos, teses, dissertações, abordagens e ferramentas utilizadas, englobando também fontes de pesquisa, revistas e editoriais. O objetivo é realizar uma avaliação aprofundada da relação entre a ACV e a emissão de GEE na construção de pavimentos asfálticos.

OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é realizar uma avaliação aprofundada da relação entre a ACV e a emissão de GEE na construção de pavimentos asfálticos.

METODOLOGIA

Adotou-se a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), um método científico explícito, abrangente e reprodutível, para identificar, avaliar e sintetizar o conhecimento atualizado sobre um tópico específico (OKOLI, 2015). Da mesma forma, Galvão e Ricarte (2019) destacam esse tipo de revisão como um recurso valioso para embasar decisões em contextos públicos e privados dentro de suas áreas de atuação.

DEFINIÇÃO DO BANCO DE DADOS

Para abordar o contexto da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na pavimentação, foram escolhidas as bases de dados Scopus e Web Of Science devido à sua ampla reputação e reconhecimento internacional.

PARÂMETROS DE BUSCA

Nesta fase, introduziu-se os parâmetros de busca com o intuito de delimitar e otimizar os resultados. O foco da pesquisa foi estabelecido como artigos completos de revistas, excluindo-se revisões, livros, capítulos de livros e resumos de congressos. O período de coleta de dados foi definido sem restrição quanto ao ano de início, abrangendo artigos publicados até o ano de 2022.

Para a filtragem dos artigos, aplicaram-se os seguintes termos de busca nas bases de dados, utilizando combinações e operadores booleanos para os títulos, resumos e palavras-chave dos documentos: ((“pavement”) AND ((“life cycle assessment”) OR (“LCA”)) AND ((“sustainability”) OR ((“greenhouse gases”) OR (“GHG”)) OR ((“carbon footprint”))) NOT (“concrete”)). Essa estratégia foi empregada devido à vasta variedade de trabalhos, revistas e editoriais disponíveis.

CRITÉRIOS PARA EXCLUSÃO DOS DOCUMENTOS

Diversos critérios foram estabelecidos para a exclusão de documentos obtidos na busca geral. Esses critérios incluíram: i) documentos não redigidos em inglês, ii) documentos provenientes de revistas sem índice JCR de 2019 (Journal Citation Reports) ou sem Fator de Impacto (FI), iii) revistas com índice JCR inferior a 2,0, iv) registros duplicados, v) trabalhos sem relevância direta para o tema e vi) análise crítica dos títulos e resumos quando necessário. Dessa forma, foram considerados apenas artigos completos em inglês, provenientes de revistas com índice JCR igual ou superior a 2,0, abordando estudos de caso, comparação de metodologias, implementação de programas, etc.

RESULTADOS DO LEVANTAMENTO

Essa fase compreendeu a análise dos estudos selecionados, formando um referencial teórico que foi analisado ao longo do artigo, destacando as informações mais relevantes obtidas. A análise dos dados do artigo abrange diferentes critérios, como o ano de publicação, país de origem, autores, palavras-chave, quantidade de citações, revista e seu índice JCR correspondente. Em relação ao conteúdo, os parâmetros de escopo mais recorrentes foram classificados, abrangendo processamento de matéria-prima, construção, manutenção, reciclagem, descarte/demolição e uso. Além disso, foram identificados os principais fatores de impacto considerados, como CO₂ equivalente, consumo energético, aquecimento global, destruição do ozônio estratosférico, entre outros.

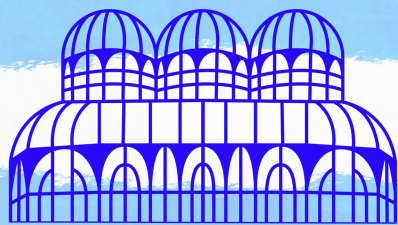
3 RESULTADOS

Por meio da estratégia metodológica adotada, foram inicialmente identificados 160 artigos na base Scopus e 259 no Web Of Science, totalizando 419 publicações. Após a aplicação dos critérios de filtragem, 380 artigos foram excluídos, resultando em uma seleção final de 39 artigos que atenderam aos critérios de refinamento. Esses artigos foram então submetidos a uma leitura completa e detalhada para possibilitar análises aprofundadas dos elementos pertinentes.

Vale destacar que cerca de 70% dos artigos estão concentrados em apenas três revistas específicas, nomeadamente o Journal of Cleaner Production, Resources, Conservation and Recycling e Transportation Research Part D: Transport and Environment. Os fundamentos metodológicos relacionados à fase de definição de objetivo e escopo envolvem conceitos como a finalidade da aplicação, as justificativas para a realização do estudo, o público-alvo, os dados e suas exigências, a delimitação do sistema, a unidade funcional, os métodos de alocação, a metodologia para avaliação de impactos, os tipos de impacto e as limitações do estudo (ABNT, 2014). No quadro 1 estão relacionados os trabalhos pesquisados, assim como os dados pertinentes aos estudos (unidade funcional, base de dados e categoria de impacto).

Quadro 1 – Dados dos artigos utilizados na pesquisa.

AUTOR	ANO DE PUBLICAÇÃO	UNIDADE FUNCIONAL		BASE DE DADOS	CATEGORIA DE IMPACTO
		Comp.	Nº de faixas		
Huang <i>et al.</i>	2009a	20,6 Km	2	P,S	C.E, GEE
Huang <i>et al.</i>	2009b	30.000 m ²	-	P	C.E, GEE, outros
Cass e Mukherjee	2011	-	-	S	GEE
Aurangzeb <i>et al.</i>	2014	1,6 Km	-	S	C.E, GEE
Araújo <i>et al.</i>	2014	1 Km	2	S	C.E, GEE
Santos <i>et al.</i>	2015	-	-	S	C.E, GEE
Santos <i>et al.</i>	2015	5,89 Km	2	S	C.E, GEE
Giani <i>et al.</i>	2015	1 Km	4	P,S	C.E, GEE, outros
Celauro <i>et al.</i>	2015	1 Km	2	S	C.E, GEE
Hasan & You	2015	1 Km	2	S	C.E, GEE, outros
Alloza <i>et al.</i>	2015	1 t	-	P,S	C.E, GEE
Noland e Hanson	2015	6,4 Km	4	S	GEE
Fernandez-Sanchez <i>et al.</i>	2015	-	-	S	GEE
Ma <i>et al.</i>	2016	20 Km	4	S	C.E, GEE
Santos <i>et al.</i>	2017	-	-	S	GEE
Celauro <i>et al.</i>	2017	1 Km	2	S	C.E, GEE, outros
Chen <i>et al.</i>	2017	-	-	-	C.E, GEE
Farina <i>et al.</i>	2017	1 m	-	P,S	C.E, GEE, outros



7º CONRESOL

7º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

Guo <i>et al.</i>	2017	1 Km	-	S	C.E, GEE
Batouli <i>et al.</i>	2017	12 pés	4	S	GEE
Bressi <i>et al.</i>	2018	1 Km	4	S	C.E, GEE
Yu <i>et al.</i>	2018	-	-	S	C.E
Moretti <i>et al.</i>	2018	1 m	2	S	C.E, GEE, outros
Chen e Wang	2018	200 pés	-	S	GEE
Cao <i>et al.</i>	2019	1 m ²	-	S	C.E, GEE
Puccini <i>et al.</i>	2019	400 e 465,5 m	2	S	C.E, GEE, outros
Gu <i>et al.</i>	2019	-	-	S	C.E, GEE
Liljenström <i>et al.</i>	2020	-	-	S	C.E, GEE
Wang <i>et al.</i>	2020	-	-	S	C.E, GEE
Bressi <i>et al.</i>	2021	1 Km	4	P,S	Outros
Shani <i>et al.</i>	2021	1,6 Km	-	S	C, W
Liu <i>et al.</i>	2021	1 Km	-	P,S	GEE
Wang <i>et al.</i>	2021	1 Km	1	S	C.E, GEE
Huang <i>et al.</i>	2021	5 Km	4	S	C.E, GEE, outros
Ma <i>et al.</i>	2021	22.500 m ²	3	S	C.E, GEE
Chen <i>et al.</i>	2021	1,6 Km	2	S	C.E, GEE, outros
Santos <i>et al.</i>	2021	1 Km	-	P,S	Outros
Hasheminejad <i>et al.</i>	2021	-	-	S	C.E, GEE, outros
Liu, Balieu e Kringos	2022	1 Km	-	P,S	C.E, GEE

P: Dados de base primária; S: Dados de base secundária; C.E: Consumo Energético; GEE: Gases do Efeito Estufa

Os objetivos associados à pesquisa sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de pavimentos rodoviários são variados, sendo comumente realizadas análises comparativas entre pavimentos rígidos (cimento Portland) e flexíveis (cimento asfáltico de petróleo). Entre as 39 pesquisas analisadas, nove (25%) tiveram como foco essa análise comparativa. Outras pesquisas direcionaram seus esforços para investigar os impactos ambientais resultantes do uso de diferentes tipos de materiais, principalmente com o objetivo de reduzir o consumo de cimentos, agregados naturais ou insumos asfálticos.

Um exemplo é o estudo realizado por Chen e Wang (2018), que examinou os impactos na emissão total de CO₂ e no consumo de energia primária de pavimentos flexíveis construídos com asfalto reciclado, realizando uma comparação direta com um pavimento flexível sem a adição de materiais reciclados em sua composição.

Dentro desse conjunto de trabalhos, merecem destaque as contribuições de Huang *et al.* (2009a e 2009b), Cass e Mukherjee (2011), Aurangzeb *et al.* (2014), Giani *et al.* (2015) e Farina *et al.* (2017). Essas pesquisas se destacam não apenas pelo elevado número de citações, mas também pela notável procura que recebem, seja devido à sua natureza pioneira ou ao impacto significativo que causaram na comunidade científica no contexto da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de pavimentos asfálticos. A pesquisa conduzida por Huang *et al.* (2009b) representa uma das primeiras incursões

identificadas na literatura. Este estudo abordou recursos significativos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) global na indústria rodoviária, destacando lacunas de conhecimento e delineando o desenvolvimento de um modelo de ACV para a construção e manutenção de pavimentos, com ênfase na incorporação de práticas de reciclagem. Por sua vez, o trabalho de Cass e Mukherjee (2011) adota métodos variados de ACV, integra dados primários e comparaos com projetos que utilizam inventários estimados, estabelecendo estratégias para mitigar os impactos ambientais ao longo do tempo.

Experiências semelhantes são encontradas nos estudos de Huang *et al.* (2009a), Aurangzeb *et al.* (2014), Giani *et al.* (2015) e Farina *et al.* (2017), que fornecem avaliações sobre a redução de emissões de CO₂-equivalente, práticas sustentáveis, quantificação do consumo de energia, uso de água ao longo do ciclo de vida, entre outros parâmetros, oferecendo uma base científica para pesquisas futuras.

No que diz respeito aos países com maior número de publicações, China, Estados Unidos e Itália se destacam. Essa tendência era previsível, especialmente para China e EUA, que abrangem, respectivamente, 90% e 94% da malha rodoviária com revestimento flexível (MA *et al.*, 2016), além de exercerem uma influência considerável nos setores industrial e de infraestrutura. Kay *et al.* (2014) indicaram que, em 2010, o setor de transportes foi responsável por

27,1% das emissões nos EUA, e, de acordo com o Banco Mundial (2011), a China contribui com 19% de todas as emissões globais e 50% das emissões na Ásia.

É evidente que a temática em questão ganhou significativa notoriedade na última década, com a maior concentração de publicações nos últimos 5 anos. Destaca-se o fato de que as publicações mais antigas remontam a 2009, revelando uma relativa recenticidade, considerando a ampla abordagem acadêmica sobre pavimentação, cuja metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi internacionalmente padronizada em 1997 e atualizada em 2006 (ISO 14040, 2006).

Em estudos que compartilham a mesma unidade funcional, especificamente com um comprimento de 1 km e duas faixas de largura, Celauro et al. (2015) e Celauro et al. (2017) analisaram os processos de manutenção e construção do pavimento, respectivamente. Essas pesquisas ressaltaram a importância da inclusão de materiais reciclados (RAP) e da estabilização do solo com cal, alcançando reduções significativas no consumo energético e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), atingindo 34% e 45%, respectivamente.

No contexto de comparações entre misturas asfálticas, Hasan & You (2015) investigaram misturas quentes, misturas mornas com espuma de água (WWMA) e misturas mornas com espuma de etanol (EWMA). Observou-se que todas apresentaram demanda energética e emissões de CO₂ mais expressivas durante a fase de construção, seguida pela fase de manutenção e, por fim, transporte. A EWMA se destacou como a mistura de menor emissão, resultando em uma redução de 9,13% em comparação com as misturas quentes. No estudo de Araújo et al. (2014), que empregou diferentes proporções de RAP, foi constatada uma variação no consumo energético e nas emissões de GEE inversamente proporcional à quantidade de material reciclado. Entre as fases de vida do pavimento, a etapa de produção de mistura apresentou o maior consumo energético e emissões de GEE.

Fernández Sánchez et al. (2015) exploraram alternativas relevantes para a redução de emissões, alinhando-se com descobertas em outros estudos na literatura revisada. Essas alternativas incluem o uso de biocombustíveis, aprimoramentos no dimensionamento e construção do pavimento para otimizar a durabilidade, a aplicação de misturas mornas ou frias, e a utilização de misturas inovadoras incorporando RAP, polímeros e borracha, conforme indicado em vários estudos citados.

A análise da literatura evidencia que os principais desafios associados à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de pavimentos rodoviários residem na definição da fronteira do sistema e de seus diversos parâmetros, como tempo de vida útil e fases do ciclo de vida. A obtenção de dados suficientes e alinhados à realidade local, o estabelecimento de unidades funcionais para permitir a comparação de resultados entre estudos distintos e a falta de padronização em relação a indicadores ambientais e metodologias de impacto ambiental específicos para pavimentos rodoviários também representam desafios significativos. Observa-se que parte das pesquisas se limita à identificação dos gases de efeito estufa emitidos ao longo das diferentes fases do ciclo de vida dos pavimentos, sem uma associação direta com potenciais indicadores de impacto ou danos ambientais, como aquecimento global, acidificação do solo ou da água, e doenças respiratórias.

4 CONCLUSÃO

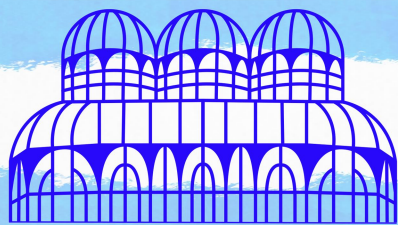
A abordagem metodológica escolhida revelou-se apropriada, permitindo a análise das principais pesquisas relacionadas à avaliação do impacto ambiental de pavimentos rodoviários, com foco nos princípios e estruturas da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), conforme estabelecido nas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014). Estas pesquisas foram identificadas ao longo dos últimos anos em bases de dados como a Scopus e Web of Science. Além disso, a metodologia permitiu alcançar os demais objetivos previamente delineados neste artigo.

Além disso, observou-se um crescente interesse na comunidade internacional sobre o tema nos últimos anos, acompanhado pela dificuldade em padronizar a unidade funcional, o que prejudica a análise comparativa entre diferentes estudos. A prevalência do uso de dados secundários é notável, justificada pela complexidade em obter informações abrangentes para todas as etapas envolvidas no processo.

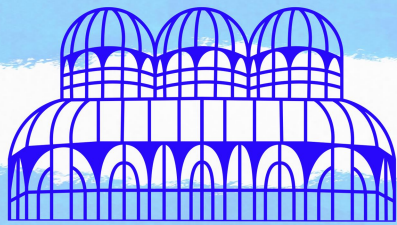
Os impactos associados à emissão de gases de efeito estufa (GEE) e ao consumo de energia foram os mais amplamente avaliados, destacando-se o aquecimento dos agregados nas misturas asfálticas quentes como uma das atividades mais impactantes. Recomenda-se a aplicação mais abrangente da ACV, juntamente com a definição de unidades funcionais mais uniformes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Ozer, H. & Yang, R. (2014). **Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content**. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 83, pp. 77-86. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.12.004



2. Batouli, M., Bienvenu, M., & Mostafavi, A. (2017). **Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 52, pp. 289-302. DOI: 10.1016/j.trd.2017.02.018.
3. Bressi, S., Santos, J., Giunta, M., Pistonesi, L., & Presti, D. L. (2018). **A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials**. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 137, pp. 76-88. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.05.028
4. Bressi, S., Santos, J., Orešković, M., & Losa, M. (2021). **A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment**. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22(4), pp. 524-538. DOI: 10.1080/10298436.2019.1623404
5. Cao, R., Leng, Z., & Hsu, S. C. (2019). **Comparative eco-efficiency analysis on asphalt pavement rehabilitation alternatives: Hot in-place recycling and milling-and-filling**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, pp. 1385-1395. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.122.
6. Cass, D. & Mukherjee, A. (2011). **Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations**. *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 137(11), pp. 1015-1025. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000349.
7. Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Casto, B. L. (2015). **Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, pp. 41-51. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.001.
8. Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., Casto, B. L., & Rizzo, A. (2017). **Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 3482-3489; DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.119.
9. Chen, J., Zhao, F., Liu, Z., Ou, X., & Hao, H. (2017). **Greenhouse gas emissions from road construction in China: A province-level analysis**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 168, pp. 1039-1047. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.243.
10. Chen, X., Wang, H. (2018). **Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 148-157. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.207.
11. Chen, X., Wang, H., Horton, R., & DeFlorio, J. (2021). **Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 91, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102697.
12. Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? CNT**, Brasília, 2017.
13. Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). **Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement**. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 117, pp. 204-212. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.10.015.
14. Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Barandica, J. M., Cornejo, E., & Serrano, J. M. (2015). **Opportunities for GHG emissions reduction in road projects: A comparative evaluation of emissions scenarios using CO2NSTRUCT**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 104, pp. 156-167. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.032.
15. Galvão, M. C. B., Ricarte, I. M. (2019). **Revisão Sistemática da Literatura: Conceituação, Produção E Publicação. Logeion: Filosofia da Informação**, vol. 6(1), pp. 57-73. DOI: 10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73.
16. Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). **Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling**. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 104, pp. 224-238. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.006.
17. Gu, F., Ma, W., West, R. C., Taylor, A. J., & Zhang, Y. (2019). **Structural performance and sustainability assessment of cold central-plant and in-place recycled asphalt pavements: A case study**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 1513-1523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.222.
18. Guo, Z., Hu, D., Zhang, Z., Zhang, P., & Zhang, X. (2017). **Material metabolism and lifecycle GHG emissions of urban road system (URS)**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 243-253. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.138.
19. Huang, M., Dong, Q., Ni, F., & Wang, L. (2021). **LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 283, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124583
20. Huang, Y., Bird, R., & Bell, M. (2009a). **A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 14(3), pp. 197-204. DOI: 10.1016/j.trd.2008.12.003.



21. Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2009b). **Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 17(2), pp. 283-296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.06.005.
22. International Organization For Standardization (ISO). (2006). **ISSO 14040:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.** Geneva, Switzerland
23. Kay, A. I., Noland, R. B., & Rodier, C. J. (2014). **Achieving reductions in greenhouse gases in the US road transportation sector,** *Energy Policy*, vol. 69(C), pp. 536-545. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.02.012.
24. Liljenström, C., Miliutenko, S., O'Born, R., Brattebo, H., Birgisdóttir, H., Toller, S., Lunderberg, K. & Potting, J. (2020). **Life cycle assessment as decision-support in choice of road corridor: case study and stakeholder perspectives.** *International Journal of Sustainable Transportation*, vol, 15. pp. 1-18. DOI: 10.1080/15568318.2020.1788679
25. Liu, Q., Wang, Z., Zhang, N., Zuo, J., Feng, H., & Duan, H. (2021). **Characterizing the impacts of highway pavement in a newly planned greater bay area economic belt in China.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 1285-1297. DOI: 10.1007/s11367-021-01922-0
26. Ma, F., Dong, W., Fu, Z., Wang, R., Huang, Y., & Liu, J. (2021). **Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 288, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125595.
27. Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., & Wang, C. (2016). **Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: A case study in China.** *Int. J. Environ. Res, Public Health*, vol. 13(3), pp. 1-15. DOI: 10.3390/ijerph13030351
28. Hasan, M. R. M., & You, Z. (2015). **Estimation of cumulative energy demand and green house gas emissions of ethanol foamed WMA using life cycle assessment analysis.** *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 1117-1124. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.029
29. Moretti, L., Mandrone, V. A. D. A., D'Andrea, A., & Caro, S. (2018). **Evaluation of the environmental and human health impact of road construction activities.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1004-1013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.250.
30. Nolan, R. B. & Hanson, C. S. (2015). **Life-cycle greenhouse gas emissions associated with a highway reconstruction: A New Jersey case study.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 731-740. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.064.
31. Okoli, C. (2015). **A guide to conducting a standalone systematic literature review.** *Communications of the Association for Information Systems*, vol. 37(43), pp. 879-910. DOI:10.17705/1CAIS.03743.
32. Puccini, M., Leandri, P., Tasca, A. L., Pistonesi, L., & Losa, M. (2019). **Improving the environmental sustainability of low noise pavements: Comparative life cycle assessment of reclaimed asphalt and crumb rubber based warm mix Technologies.** *Coatings*, vol. 9(5), pp. 1-17. DOI: 10.3390/coatings9050343.
33. Santos, C. Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: Uma abordagem probabilística. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2011
34. Santos, J., Bryce, J., Flintsch, G., Ferreira, A., & Diefenderfer, B. (2015). **A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices.** *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 11(9), pp. 1199-1217. DOI: 10.1080/15732479.2014.945095.
35. Santos, J., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2017). **A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 1380-1393. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.027.
36. Santos, J., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2015). **A life cycle assessment model for pavement management: Road pavement construction and management in Portugal.** *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 16(4), pp. 315-336. DOI: 10.1080/10298436.2014.942862.
37. Santos, J., Pham, A., Stasinopoulos, P., & Giustozzi, F. (2021). **Recycling waste plastics in roads: A life-cycle assessment study using primary data.** *Science of the Total Environment*, vol. 751, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141842.
38. Savietto, J. **Análise de impactos ambientais da restauração de pavimentos asfálticos pela avaliação do ciclo de vida.** *Dissertação de Mestrado.* Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2017
39. Shani, P., Chau, S., & Swei, O. (2021). **All roads lead to sustainability: Opportunities to reduce the life-cycle cost and global warming impact of U. S. roadways.** *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 173, pp. 1-15. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105701
40. Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., & Zhang, L. (2021). **Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 297, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126659.



41. Wang, H., Al-Saadi, I., Lu, P., & Jasim, A. (2020). **Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment.** *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, pp. 1-10. DOI: 10.1080/15568318.2018.1519086
42. Wang, X., Duan, Z., Wu, L., & Yang, D. (2015). **Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 103, pp. 705-714. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.030.
43. Yu, B., Sun, Y., & Tian, X. (2018). **Capturing time effect of pavement carbon footprint estimation in the life cycle.** *Journal of Cleaner Production*, vol. 171, pp. 877-883. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.266.