



Análise de Ciclo de Vida de uso e Manutenção de Rodovias: Uma Revisão Bibliométrica

Life Cycle Analysis (LCA) of Highway use and Maintenance: A Bibliometric Review

João Marbio Pires Iturbide

Silmo Schöler

Eduardo Alcayaga Lobo

Jorge André Ribas Moraes

Liane Mahlmann Kipper

Carine Baggio

Carlos Alexandre Lutterbeck

Enio Leandro Machado

Resumo: Para uma melhor compreensão da temática da análise de ciclo de vida de uso e manutenção de rodovias, realizou-se uma análise bibliométrica utilizando os termos de pesquisa “LCA”, “highway”, e “maintenance”, na base de dados “Scopus”, no período entre 2014 e 2023. Foram encontradas 96 publicações, tendo como resultado a formação de três clusters em relação aos termos de pesquisa, sendo eles: (i) ciclo de vida; (ii) impacto ambiental; e (iii) gases de efeito estufa. Além disso, a revisão identificou os principais países e instituições de pesquisa que desenvolveram estudos com esta temática. Concluímos que os dados coletados na presente revisão, demonstram uma forte correlação entre: (i) ciclo de vida, manutenção, desenvolvimento sustentável, planejamento das rodovias; (ii) impacto ambiental; avaliação de ciclo de vida; pavimento asfáltico; análise de ciclo de vida; e (iii) gases de efeito estufa; utilização da energia; administração das rodovias, estradas e ruas. Os países europeus e asiáticos predominam nesta área de pesquisa, sendo a China o principal país com produção científica nesta área, seguido pelos Estados Unidos da América. Esta revisão procurou levantar as principais questões em torno da análise de ciclo de vida em uso e manutenção de rodovias, contribuindo para a sustentabilidade ambiental econômica e social na manutenção das rodovias.

Palavras-chave: Análise de ciclo de vida (ACV); rodovias; manutenção; Gases de Efeito Estufa (GEE).

Abstract: To better understand the topic of life cycle analysis of highway use and maintenance, a bibliometric analysis was carried out using the search terms “LCA”, “highway”, and “maintenance”, in the “Scopus” database, in the period between 2014 and 2023. 96 publications were found, resulting in the formation of three clusters in relation to the search terms, namely: (i) life cycle; (ii) environmental impact; and (iii) greenhouse gases. Furthermore, the review identified the main countries and research institutions that developed studies on this topic. We conclude that the data collected in this review demonstrate a strong correlation between: (i) life cycle, maintenance, sustainable development, highway planning; (ii) environmental impact; life cycle assessment; asphalt pavement; life cycle analysis; and (iii) greenhouse gases; energy use; administration of highways, roads and streets. European and Asian countries predominate in this area of research, with China as the main country with scientific production in this area, followed by the United States of America. This review

sought to provide subsidies in the search for resolving the problems raised, aiming, through the analysis of the life cycle of use and maintenance of highways, to contribute to economic and social environmental sustainability in highway maintenance.

Keywords: Life cycle analysis (LCA); highways.; maintenance.; Greenhouse Gases (GHG).

INTRODUÇÃO

A Agenda 2030 adotada pelas Nações Unidas em 2015, dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) aborda as necessidades das pessoas, do planeta e da prosperidade, e preconiza que os sistemas de transporte devem ser: (i) sustentáveis; (ii) ter qualidade e resiliência; (iii) serem seguros; e (iv) acessíveis (Praticò; Giunta; Mistretta; Gulotta, 2021).

Entretanto no modal rodoviário a manutenção e a reabilitação no seu esforço para restaurar as condições da rodovia, geram a emissão de gases de efeito estufa (GEE) que impactam o meio ambiente. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é utilizada para estimar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outros danos causado ao meio ambiente (Handayani; Pramesti; Setyawan, 2019). Já, Condurat e Ursanu (2019), destacam a necessidade da adoção de alternativas construtivas adequadas para pavimentos rodoviários, na sua fase inicial de construção, bem como nas suas fases subsequentes de manutenção e intervenção, com o objetivo de ter um ambiente de construção sustentável. Entretanto, no processo de análise da avaliação do ciclo de vida das estradas (ACV), há muitas incertezas e ignorar essas incertezas levará a resultados e tomadas de decisão tendenciosos (Liu *et al.* 2023).

Ainda, tratando-se de construção e manutenção, a utilização de resíduos sólidos reciclados na construção de pavimentos rodoviários tornou-se recentemente um tema de discussão sobre sustentabilidade, pelos potenciais benefícios ambientais e econômicos que gera (Li; Xiao; Zhang; Amirkhanian, 2019). Também, a diminuição das etapas de manutenção resulta em menos obras nas rodovias, menos engarrafamentos e, por consequência, menos emissões de CO₂ (Schlegel; Puiatti; Ritter; Lesueur *et al.*, 2016).

Por sua vez, a análise bibliométrica permite analisar o estado da arte através da produção científica registrada em banco de dados, e possibilita classificar um país em relação ao restante do mundo, cientistas em relação à comunidade de investigadores e uma instituição em relação a um país (Soares; Carneiro; Calmon; Castro, 2016). Ainda, segundo Ugolini *et al.* (2015), estudos bibliométricos são ferramentas usadas para avaliar as características sociais e científicas sobre um determinado tema, que permite a análise da evolução, quantidade, qualidade e distribuição da produção científica na área de pesquisa. Também, a análise bibliométrica é uma metodologia usada para coletar informações sobre um domínio específico da pesquisa (Secinaro; Calandra; Petricean; Chmet, 2021), na qual a subjetividade inerente é minimizada e o método é reprodutível (Corsini; Certoma; Dyer; Frey, 2019).

Neste contexto, através da análise bibliométrica, a pesquisa teve como objetivo entender e responder às indagações referentes ao atual estado da arte na ACV de uso e manutenção de rodovias, considerando os últimos dez anos.

MATERIAIS E MÉTODOS

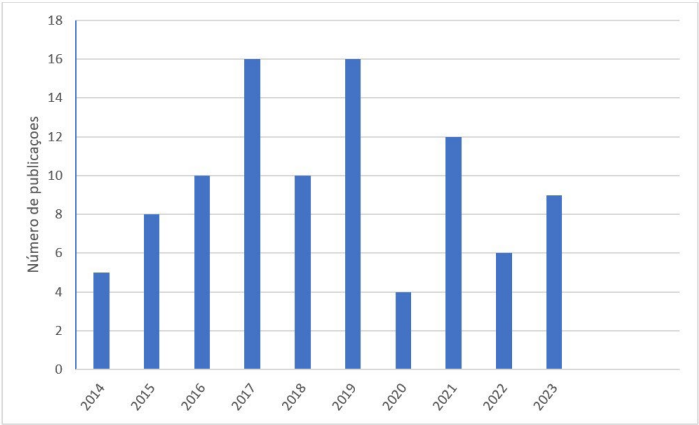
A análise bibliométrica foi realizada aplicando os termos de pesquisa “LCA”, “Highway” e “Maintenance” que foram escolhidos, por serem abrangentes, representarem o tema ACV de uso e manutenção de rodovias. As publicações científicas foram selecionadas na base de dados “Scopus”, no período de 2014 a 2023. Os resultados obtidos foram analisados com o software “VOSviewer” versão 1.6.13. Foi utilizado o mapeamento bibliométrico para verificar os principais temas citados na literatura científica e pesquisar a correlação entre as palavras mais citadas, também determinar os principais países dedicados a este campo de pesquisa.

Os cenários científicos foram gerados e visualizados no software “VOSviewer”, que foi configurado para utilizar a coocorrência de termos, por meio de contagem binária, com o mínimo de 15 ocorrências para o mesmo termo. Utilizou-se um mínimo de 60% de relevância dos termos (De Souza; Hoeltz; Benitez; Machado *et al.*, 2019). Também foram consideradas as principais instituições de pesquisa e o número de publicações no período, classificando-as nas diferentes áreas de conhecimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa realizada identificou 96 publicações, entre os anos de 2014 e 2023, o que demonstra o interesse da comunidade científica por este tema, observando-se uma oscilação no número de publicações anuais (Figura 1). Os anos de 2017 e 2019 apresentaram o maior número de publicações, com 16 publicações em cada ano.

Figura 1 - Volume de publicações entre 2014 e 2023, disponíveis na base de dados “Scopus”, utilizando os termos “LCA”, “Highway” e “Maintenance”.



Principais Países e Instituições Envolvidas

As 96 publicações detectadas na análise dos dados, permitiram o reconhecimento das principais áreas do conhecimento abordadas e a identificação das principais comunidades científicas e grupos de pesquisa estabelecidos (tTabela 1).

Tabela 1 - Principais áreas de investigação relacionadas aos termos “LCA”, “Highway” e “Maintenance”, volume de publicações por área de investigação, principais grupos de investigação e número total de publicações, no período de 2014 e 2023, na análise bibliométrica realizada na base de dados “Scopus” (Nº PUB: Número de publicações).

Ano / Área de pesquisa	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Total	Principais organiza- ções envolvidas	Nº PUB
Engenha- ria	2	6	6	12	7	11	3	5	4	7	63	- Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra - Virginia Polytechnic Institute and State University - Virginia Tech Trans- portation Institute - Southeast University	8 8 8 8 7

Ano / Área de pesquisa	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Total	Principais organizações envolvidas	Nº PUB
Ciências Ambientais	3	4	2	8	5	8	2	6	2	4	44	- Ministry of Education of the People's Republic of China - Chang'an University - Université Gustave Eiffel - Environnement, Aménagement, Sécurité et Éco-Conception (EASE) - Shenzhen University	4 4 4 4 2
Energia	1	1	-	3	3	5	1	3	-	3	20	- Ministry of Education of the People's Republic of China - Chang'an University - Southeast University - Direction Technique - The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division	3 3 2 1 1
Ciências Sociais	-	2	4	2	4	3	-	2	1	-	18	- Chang'an University -Athena Sustainable Materials Institute - Federal German Association of the Lime Industry - Manitoba Infrastructure and Transportation (MIT) - Cement Association of Canada	2 1 1 1 1
Gestão Empresarial e Contabilidade	1	1	-	3	1	4	1	2	-	3	16	- Ministry of Education of the People's Republic of China - Southeast University - Chang'an University - Direction Technique - The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division	3 2 2 1 1

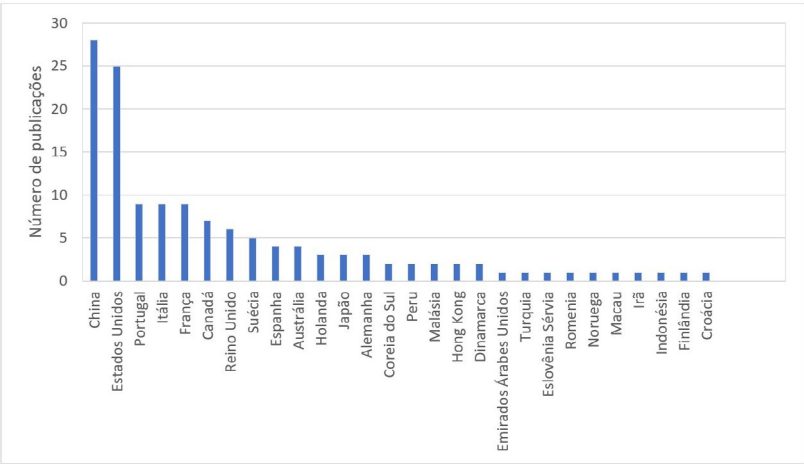
Ano / Área de pesquisa	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Total	Principais organizações envolvidas	Nº PUB
Ciência dos Materiais	-	-	-	1	2	2	1	-	2	-	8	- Nanjing Modern Comprehensive Transportation Laboratory	1
												- Chalmers University of Technology	1
												- Ministry of Education of the People's Republic of China	1
												- The Royal Institute of Technology (KTH)	1
												- Southeast University	1

Vários grupos de pesquisa se destacaram quanto ao volume de produção científica no período de 2014 a 2023. As duas áreas do conhecimento com maior número de trabalhos são “engenharia” e “ciências ambientais”. A primeira, que é a área de atuação que se dedica a oferecer soluções práticas para problemas concretos, nesta área destacaram-se: Universidade de Coimbra; Faculdade de Ciências e Tecnologia; *Virginia Polytechnic Institute and State University*; *Virginia Tech Transportation Institute*; e *Southeast University*. Na segunda área do conhecimento, destacam-se os grupos de pesquisa do: *Ministry of Education of the People's Republic of China*; *Chang'an University*; *Université Gustave Eiffel*; *Environnement, Aménagement, Sécurité et Éco-Conception* (EASE). Na terceira posição aparece a área “energia”, com destaque para os grupos de pesquisa do: *Ministry of Education of the People's Republic of China*; e *Chang'an University*. Na quarta posição aparece a área “ciências sociais”, com destaque para a *Chang'an University*.

Em relação aos países com maior volume de produção científica, se destaca-se a China com 28 publicações, no período de 10 anos, conforme Figura 2. Os Estados Unidos da América se destacam como segundo país, com 25 publicações científicas.

Em relação aos continentes, o europeu aparece em primeiro lugar com 69 publicações científicas, seguido pelo asiático com 43 e americano com 28.

Figura 2 - Países que mais se destacam em publicações utilizando os termos ““LCA”, “Highway” e “Maintenance”, com base em pesquisa bibliométrica no “Scopus” entre 2014 e 2023.



Os autores com o maior número de publicações, as principais palavras chaves e o número de ocorrência estão descritos na tabela 2.

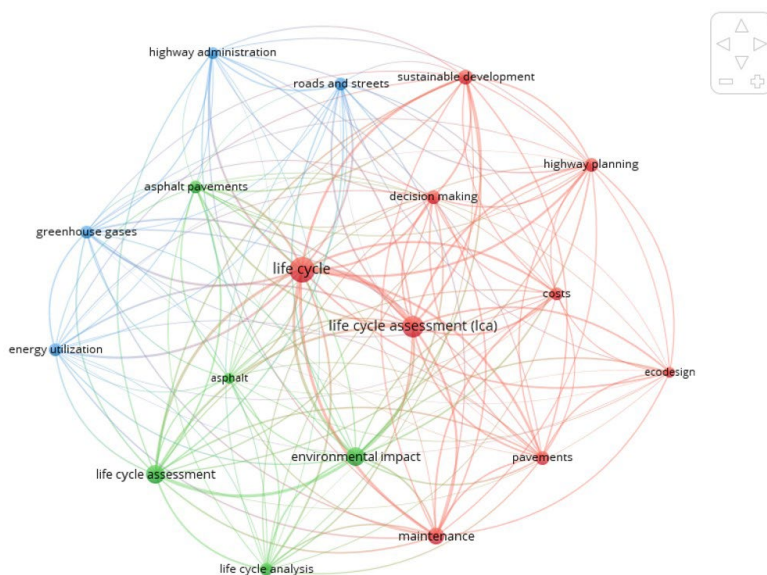
Tabela 2 - Principais autores que publicaram e as palavras mais citadas.

Autor/ Palavras	Número de publicações	Análise de ciclo de vida	Ciclo de vida	Gases de efeito estufa	Desenvolvimento sustentável Desenvolvimento sustentável	Pavimentos	Custos	Pavimentos asfálticos Pavi- mentos asfálticos	Impactos ambientais	Planejamento de rodovias	Administração de rodovias	Reciclagem
Santos, J.	11	17	11	5	9	5	5	6	5	-	5	5
Ferreira, A.	9	13	9	4	8	5	5	4	4	6	5	4
Flintsch, G	6	13	9	7	8	5	5	4	4	6	5	4
Cerezo,	4	5	4	4	3	2	3	2	1	2	-	2
Liu, Y.	3	5	2	9	-	2	-	1	1	1	-	-
Wang, Y.	3	5	2	9	-	2	-	1	1	-	-	-
TOTAL	36	58	37	38	28	21	18	18	16	15	15	15

Termos de pesquisa

Os termos de pesquisa aplicados na análise bibliométrica identificaram a formação de três clusters, “ciclo de vida”, “impacto ambiental” e “gases de efeito estufa”, conforme a figura 3.

Figura 3 - Principais termos encontrados pela pesquisa bibliométrica na base de dados “Scopus”, entre 2014 e 2023. Visão geral do mapa.



O primeiro cluster, em vermelho, destaca quatro termos relevantes em ordem decrescente de ocorrência, que são: “ciclo de vida”, “manutenção”, “desenvolvimento sustentável” e “planejamento das rodovias”. Ciclo de vida e avaliação de ciclo de vida estão associados, pois através do ciclo de vida é determinado o inventário ou a delimitação do produto ou do serviço proposto, e a avaliação do ciclo de vida é qualificação do impacto ambiental causado pelo produto ou serviço proposto. AACV é aceita mundialmente pela indústria rodoviária para medir e avaliar o desempenho ambiental dos materiais e processos utilizados ao longo da vida útil do pavimento, a partir da identificação e determinação da intensidade de emissão de GEE (Krau; Enríquez-León; Aragão; Caldas *et al.*, 2021).

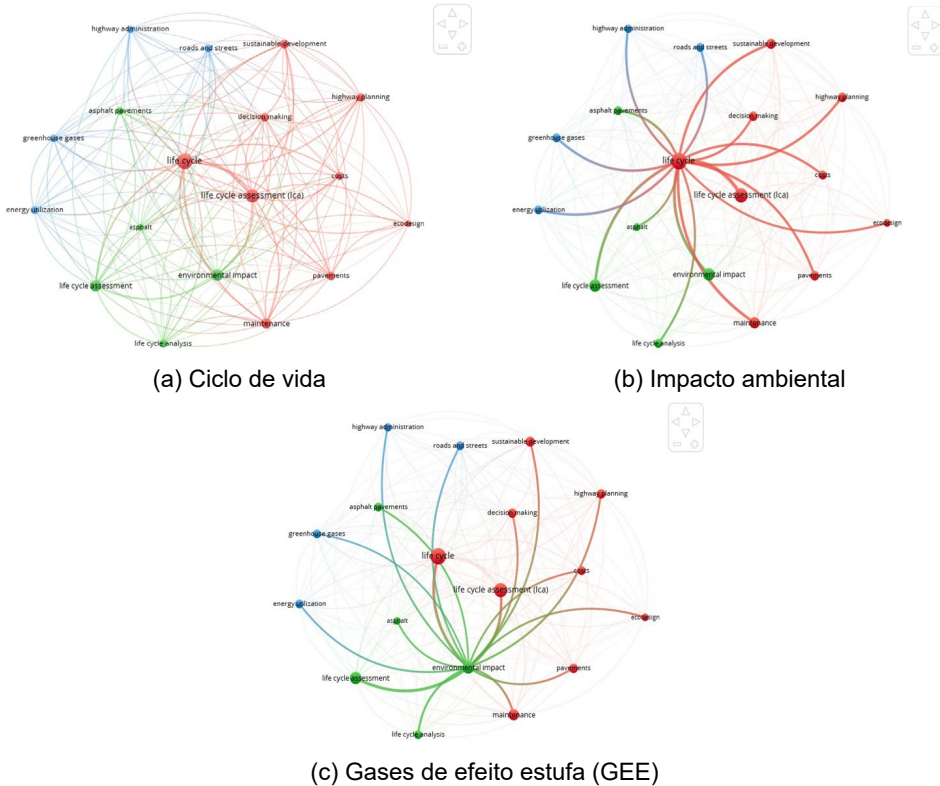
O segundo cluster, em verde, também com quatro termos relevantes em ordem decrescente de ocorrência, que são: “impacto ambiental”, “avaliação de ciclo de vida”; “pavimento asfáltico” e “análise de ciclo de vida”. O impacto ambiental é a consequência do produto ou serviço prestado ou proposto.

O terceiro cluster, em azul, tem quatro termos relevantes em ordem decrescente de ocorrência, que são: “gases de efeito estufa”, “utilização da energia”, “administração das rodovias” e “estradas e ruas”. O termo mais expressivo é “gases de efeito estufa”. A produção de materiais, a utilização de rodovias e o

congestionamento devido ao bloqueio das rodovias dominam o uso de energia no ciclo de vida relacionado com os pavimentos e as emissões de GEE (Chong; Wang, 2017).

A figura 4, por sua vez, representa os clusters separados de cada um dos termos “LCA”, “Highway” e “Maintenance”, e como ocorreram as relações e conectividades.

Figura 4 - Destaques para os termos obtidos com base na análise bibliométrica: (a) “LCA”; (b) “Highway”; e (b) “Maintenance”.



Ciclo de Vida

“Ciclo de vida” foi o termo mais encontrado em nossa análise. Este termo está associado diretamente aos termos “manutenção”, “desenvolvimento sustentável”, e “planejamento das rodovias”. O ciclo de vida para a manutenção de rodovias é dividido em quatro processos: produção de matéria-prima; produção de mistura; construção de campo; e transporte de materiais (Tang; Kuai; Huang, 2016). Contudo, do ponto de vista da avaliação do ciclo de vida a manutenção de rodovias tem grande influência na operação do tráfego e no meio ambiente em muitos aspectos (ACV) (Liu; Zhang; Qian; Chen *et al.*, 2023). Porém, dentro do ciclo de vida do

pavimento, há uma diversidade de incertezas, como o crescimento futuro do tráfego e a deterioração do pavimento (Renard; Corbett; Swei, 2021).

Para modelar decisões de tempo de manutenção preventiva considerando fatores econômicos, sociais e ambientais, Guan et. al. (2023) propõem uma abordagem integrada que combina ACV e análise do custo do ciclo de vida (ACCV). Também, He et al. (2021), propõem uma ferramenta de apoio à decisão para verificar os principais impactos econômicos, sociais e ambientais do ciclo de vida das atividades e projetos de intervenção de rodovias integrando a ACV e a LCCA. Com as crescentes preocupações ambientais sobre os equipamentos e técnicas utilizadas, empresas defrontam-se com decisões difíceis para a construção, manutenção e reabilitação das suas infraestruturas rodoviárias (Mantalovas; Di Mino; Inzerillo; Roberts, 2021).

Em relação à gestão de pavimentos as empresas de rodovias adotam principalmente o sistema de LCCA, para avaliar a eficiência econômica de projetos de manutenção e reabilitação de pavimentos (Santos; Ferreira; Flintsch, 2017). Já, os métodos de otimização multiobjetivo têm atraído um interesse crescente das empresas de rodovias como uma ferramenta para auxiliar a melhorar a sustentabilidade dos pavimentos (Santos; Cerezo; Flintsch; Ferreira, 2019). Por outro lado, o modelo de aprendizagem por reforço tende a selecionar menos reabilitações e mais manutenções preventivas do que o modelo de hierarquia baseada em limites (Yao; Leng; Jiang; Ni, 2022).

Por outro lado, projetos de manutenção de rodovias que utilizam tecnologia de reparo de rejuntamento com alto teor de polímeros, apresentam uma redução substancial nas emissões de dióxido de carbono – CO₂ (Zhong; Xu; Zhang; Cheng et al., 2023). Wang et al. (2023) analisaram a durabilidade de diferentes materiais e estruturas do pavimento de pontes, e estabeleceram um modelo de emissão de carbono do pavimento da ponte durante todo o ciclo de vida. Contudo a manutenção preventiva é considerada mais sustentável do que a manutenção corretiva (Pellecuer, 2016).

Impacto Ambiental

“Impacto ambiental” foi o segundo termo de maior destaque encontrado na análise, sendo que este termo apresenta uma forte correlação com os termos “avaliação de ciclo de vida”, “pavimento asfáltico” e “análise do ciclo de vida”. Apesar de que a sustentabilidade seja uma preocupação crescente na engenharia de pavimentos, o quesito ambiental raramente é utilizado pelos gestores de pavimentos para eleger práticas de manutenção (Torres-Machi; Nasir; Achebe; Saari et al., 2019). Por sua vez, a construção, operação e manutenção de estradas e rodovias causam danos significativos ao ecossistema (Picardo; Galván; Soltero; Peralta, 2023). Já, o desmatamento devido a alterações diretas no uso do solo é o principal hotspot ambiental em termos de alterações climáticas, enquanto nas restantes categorias de impacto o tráfego é o principal portador dos encargos ambientais (Larrea-Gallegos; Vázquez-Rowe; Gallice, 2017). Por outro lado, a monetização do

custo ambiental é favorável para aprimorar o impacto ambiental na construção de rodovias, a ser observado na contabilidade de custos (Zhang; Wnag; Liu, 2014).

Os principais indicadores de desempenho utilizados para avaliar os impactos ambientais nas fases de construção, controle de qualidade e gestão de infraestruturas aplicadas em estradas e rodovias, podem ser traduzidos em custos, indicando a perda de valor econômico provocada pela degradação dos indicadores ambientais (Faleschini; Zanini, 2022). Já, a ACV de pavimentos oferece uma abordagem abrangente para avaliar os potenciais impactos ambientais associados em todas as fases da vida de um pavimento, ou seja: produção de material, projeto do pavimento, construção, fase de uso, manutenção e fim de vida (Chkaiban; Hajj; Bailey; Sime *et al.*, 2022).

A natureza e a origem dos impactos ambientais são altamente influenciadas pelas tecnologias de controle de emissões, características das estradas e volume de tráfego (Osorio-Tejada; Llera-Sastresa; Scarpellini, 2022). Neste sentido, a ACV objetiva otimizar o projeto, com ênfase na sustentabilidade ambiental (Pasetto; Pasquini; Giacomello; Baliello, 2017). Hou *et al.* (2022), propõem um modelo integrado de ACV-CCV para fatores ambientais e econômicos nos esquemas técnicos de engenharia rodoviária para problemas relacionados a limitações da avaliação unidimensional, o escopo restrito, a dificuldade em rastrear fontes, e as divergências de várias dimensões nos métodos de avaliação integrada atuais. Por sua vez, Huang *et al.* (2021) propõem uma metodologia integrada que unifica ACV e ACCV, para a tomada de decisão de manutenção, considerando o desempenho econômico e ambiental. Também, Khavandi e Molhemaza (2023) propõem uma estrutura para avaliação sustentável de pavimentos rodoviários pela integração dos métodos ACV e ACCV. Para isso, desenvolveram uma ferramenta que utiliza a tomada de decisão multicritério para determinar a alternativa mais sustentável de projeto de pavimento.

Contudo, os resultados da ACV mostram que os impactos ambientais do sistema de pavimentos permeáveis são originados principalmente a partir da fase material, em termos de 81% a 92% de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e 70% a 83% de consumo de energia (Chen; Wang, 2022). Entretanto na construção e manutenção de pontes, o impacto ambiental na fase de produção e processamento da matéria-prima foi o maior, em segundo lugar está a fase de construção, e em terceiro lugar a fase de operação e manutenção (Ma; Li; Xue; Liu, 2021).

Na construção de estradas asfaltadas, grandes quantidades de poluentes ambientais são produzidos durante os processos de construção, operação, manutenção e gestão (Im; Kim; Liu; Park *et al.*, 2018). Entretanto, o aproveitamento de materiais reciclados em misturas betuminosas para construção e manutenção de pavimentos rodoviários tem o potencial de mitigar a utilização de recursos não renováveis, preservando o meio ambiente (Bressi; Santos; Orešković; Losa, 2021). Também, a utilização crescente de pavimento asfáltico recuperado, traz um benefício ambiental maior (Zhu; Wang; Gu, 2021).

Gases de Efeito Estufa (GEE)

“Gases de efeito estufa” foi o terceiro termo de maior destaque encontrado na análise, sendo que este termo apresenta uma forte correlação com os termos “utilização de energia”, “administração das rodovias” e “estradas e ruas”. O setor dos transportes gera emissões diretas e indiretas que afetam imensamente o meio ambiente, sendo responsável por aproximadamente um terço do total das emissões de carbono. Desta forma, o processo de planificação ecológica da construção de estradas desempenha um papel vital na redução da pegada de carbono (Mao; Duan; Dong; Zuo *et al.*, 2017). Também, as rodovias emitem grandes quantidades de CO₂ durante todo o seu ciclo de vida, incluindo emissões originadas na produção de matérias-primas e também emissões oriundas da construção, operação, manutenção e reabilitação das rodovias (Wahid; Ramli; Aminudin; Noor *et al.*, 2019). Além disso, a construção em grande escala de infraestruturas de transporte resulta no consumo de muitos recursos e num impacto ambiental significativo. Além disso, metodologias para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa da construção de rodovias são necessárias (Liu; Wang; Zhang; Zuo *et al.*, 2021).

Em consequência da grande quantidade de gases de efeito estufa (GEE) emitidos é importante avaliar os impactos ambientais das diversas tecnologias de manutenção, para que os impactos dos pavimentos asfálticos possam ser compreendidos e reduzidos (Ma; Dong; Fu; Wang *et al.*, 2021). Portanto, é imperativo encontrar um modo de reduzir os custos do ciclo de vida (LCC) e os custos ambientais associados às emissões de CO₂ na construção de rodovias (CHOI, 2019). Entretanto são necessários requisitos urgentes de proteção ambiental que forcem a mudança da indústria de pavimentos e os esforços de pesquisa da comunidade acadêmica, no sentido do desenvolvimento de tecnologias de pavimentação rodoviária de baixas emissões (Santos; Bressi; Cerezo; Lo Presti *et al.*, 2018).

Um modelo de tomada de decisões sobre manutenção e reabilitação de rodovias exerce um papel considerável no desenvolvimento sustentável das redes rodoviárias (Chen; Wang, 2023). Também, a conversão do setor da construção de rodovias é fundamental para atingir a neutralidade carbônica, e muitas partes interessadas preveem a sua descarbonização através da digitalização (De Bortoli; Baouch; Masdan, 2023). Já, a manutenção preditiva pode ajudar a obter reduções em termos de custos financeiros e de emissões de CO₂ simultaneamente (Liu; Li; Wang; Wang *et al.*, 2023).

Estudos raramente consideraram a influência da absorção pelas plantas às margens das rodovias. A engenharia verde pode melhorar o ambiente rodoviário, e oferecer benefícios ao absorver CO₂, o que poderia compensar emissões de todo o ciclo de vida da autoestrada (Li; Wang; Liu; Feng *et al.*, 2018).

Pavimentos asfálticos tendem a gerar mais emissões de GEE do que os pavimentos de concreto devido às trocas mais frequentes dos pavimentos asfálticos (Guo; Xu; Yang; Guo *et al.*, 2019). Já, os veículos rodoviários são responsáveis por aproximadamente um quarto das emissões anuais de GEE nos EUA (Wang; Harvey; Kendall, 2014). Entretanto, a escolha dos veículos em determinadas situações,

possibilita a redução de emissões de gases pela frota apenas pela introdução de modificações em procedimentos (Marcilio; De Assis Rangel; Peixoto, 2017).

A manutenção de rodovias no Reino Unido utiliza quantidades consideráveis de recursos naturais sendo responsável por uma grande quantidade de emissões de GEE (Itoya; El-Hamalawi; Ison; Frost *et al.*, 2015). Já, a Suécia deverá ter zero emissões líquidas de GEE até 2045. Para atingir este objetivo, as partes envolvidas no planejamento e construção da infraestrutura de transportes pretendem reduzir para metade o seu impacto climático até 2030 (Liljenström; Toller; Åkerman; Björklund, 2019). Dessa forma, as evidências de um estudo permitem identificar as tendências tecnológicas no planejamento rodoviário e suas lacunas de conhecimento para orientar as ações no futuro (Castañeda *et al.* 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão mostrou a capacidade da pesquisa bibliográfica em revelar conhecimento tradicional sobre ACV de uso e manutenção de rodovias, através dos termos de pesquisa “LCA”, “rodovias” e “manutenção”, a partir de dados primários dispersos.

Concluímos que os dados coletados na presente revisão, demonstram uma forte correlação entre: (i) ciclo de vida, manutenção, desenvolvimento sustentável, planejamento das rodovias; (ii) impacto ambiental, avaliação de ciclo de vida, pavimento asfáltico, análise de ciclo de vida; e (iii) gases de efeito estufa, utilização da energia, administração das rodovias, estradas e ruas. Os países europeus e asiáticos predominam nesta área de pesquisa, tendo a China como o principal país com produção científica nesta área, seguido pelos Estados Unidos da América.

REFERÊNCIAS

- BRESSI, S.; SANTOS, J.; OREŠKOVIĆ, M.; LOSA, M. **A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment.** International Journal of Pavement Engineering, 22, n. 4, p. 524-538, 2021. Article.
- CHEN, X.; WANG, H. **Life-cycle assessment and multi-criteria performance evaluation of pervious concrete pavement with fly ash.** Resources, Conservation and Recycling, 177, 2022. Article.
- CHEN, Z.; WANG, D. **Numerical analysis of a multi-objective maintenance decision-making model for sustainable highway networks: Integrating the GDE3 method, LCA and LCCA.** Energy and Buildings, 290, 2023. Article.
- CHKAIBAN, R.; HAJJ, E. Y.; BAILEY, G.; SIME, M. *et al.* **Enhanced Models for Vehicle Fuel Consumption for Life Cycle Assessment of Pavements.** In: RILEM Bookseries: Springer Science and Business Media B.V., 2022. v. 27, p. 703-710.

CHOI, J. H. **Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement.** Journal of Cleaner Production, 209, p. 88-100, 2019. Article.

CONDURAT, M.; URSANU, C., 2019. **English, Study concerning the conception and construction of Long-Lasting Flexible Pavements.** Institute of Physics Publishing. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074890051&doi=10.1088%2f1755-1315%2f329%2f1%2f012015&partnerID=40&md5=34ea572eec71128048b6ce3b874bbbc><https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074890051&doi=10.1088%2f1755-1315%2f329%2f1%2f012015&partnerID=40&md5=34ea572eec71128048b6ce3b874bbbc>.

CORSINI, F.; CERTOMA, C.; DYER, M.; FREY, M. **Participatory energy: Research, imaginaries and practices on people' contribute to energy systems in the smart city.** Technological Forecasting and Social Change, 142, p. 322-332, May 2019.

DE BORTOLI, A.; BAOUCH, Y.; MASDAN, M. **BIM can help decarbonize the construction sector: Primary life cycle evidence from pavement management systems.** Journal of Cleaner Production, 391, 2023. Article. DE SOUZA, M. P.; HOELTZ, M.; BENITEZ, L. B.; MACHADO, E. L. *et al.* Microalgae and Clean Technologies: A Review. Clean-Soil Air Water, 47, n. 11, Nov 2019.

FALESCHINI, F.; ZANINI, M. A., 2022, English. **Environmental Performance Indicators for Roadway and Highway Infrastructures Management.** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 1343-1350. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85121924062&doi=10.1007%2f978-3-030-91877-4_153&partnerID=40&md5=2313318778f49b375534a0fe1c3892afhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85121924062&doi=10.1007%2f978-3-030-91877-4_153&partnerID=40&md5=2313318778f49b375534a0fe1c3892af.

GUO, C.; XU, J.; YANG, L.; GUO, X. *et al.* **Life cycle evaluation of greenhouse gas emissions of a highway tunnel: A case study in China.** Journal of Cleaner Production, 211, p. 972-980, 2019. Article.

HANDAYANI, F. S.; PRAMESTI, F. P.; SETYAWAN, A., 2019. **English, Unit processes identification of maintenance on rigid and flexible pavement of local road.** Institute of Physics Publishing. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074641849&doi=10.1088%2f1757-899X%2f615%2f1%2f012115&partnerID=40&md5=9172730c579c9a481ce62d7952f10d8a><https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074641849&doi=10.1088%2f1757-899X%2f615%2f1%2f012115&partnerID=40&md5=9172730c579c9a481ce62d7952f10d8a>.

HE, S.; SALEM, O.; SALMAN, B. **Decision Support Framework for Project-Level Pavement Maintenance and Rehabilitation through Integrating Life Cycle Cost Analysis and Life Cycle Assessment.** Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements, 147, n. 1, 2021. Article.

HOU, Y.; QIAN, X.; ZHANG, R.; GU, F. *et al.* **Study on an Integrated LCA-LCC Model for Assessment of Highway Engineering Technical Schemes.** Buildings, 12, n. 7, 2022. Article.

HUANG, M.; DONG, Q.; NI, F.; WANG, L. **LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance.** Journal of Cleaner Production, 283, 2021. Article.

IM, J. G.; KIM, D. H.; LIU, J. N.; PARK, J. Y. *et al.*, 2018. **English, Analysis of Construction-specific Environmental Load Characteristics in the Road Paving Work Maintenance & Management Phase.** Institute of Physics Publishing. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050035860&doi=10.1088%2f1755-1315%2f164%2f1%2f012033&partnerID=40&md5=fc3d923b43a7a7e1bdc8cb34973c0bc7https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050035860&doi=10.1088%2f1755-1315%2f164%2f1%2f012033&partnerID=40&md5=fc3d923b43a7a7e1bdc8cb34973c0bc7>.

ITOYA, E.; EL-HAMALAWI, A.; ISON, S. G.; FROST, M. W. *et al.* **Development and implementation of a lifecycle carbon tool for highway maintenance.** Journal of Transportation Engineering, 141, n. 5, 2015. Article.

KHAVANDI KHIAMI, A.; MOLHEMAZAR, A. **Sustainability assessment of road pavement designs by integration of LCA and LCCA.** International Journal of Pavement Engineering, 24, n. 2, 2023. Article.

KRAU, M. M. T.; ENRÍQUEZ-LEÓN, A. J.; ARAGÃO, F. T. S.; CALDAS, L. R. *et al.* **Avaliação do ciclo de vida (ACV) na pavimentação asfáltica: Uma revisão sistemática da literatura.** 2021.

LARREA-GALLEGOS, G.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; GALLICE, G. **Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru.** International Journal of Life Cycle Assessment, 22, n. 7, p. 1109-1124, 2017. Article.

LI, D.; WANG, Y. Q.; LIU, Y. Y.; FENG, S. *et al.*, 2018, **English, Estimating life-cycle CO2 emissions from freeway greening engineering.** American Society of Civil Engineers (ASCE). 2962-2971. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044190264&doi=10.1061%2f9780784480915.311&partnerID=40&md5=ba7c8ac642e4a24555d2b5347c2753bahttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044190264&doi=10.1061%2f9780784480915.311&partnerID=40&md5=ba7c8ac642e4a24555d2b5347c2753ba>.

LI, J.; XIAO, F.; ZHANG, L.; AMIRKHANIAN, S. N. **Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review.** Journal of Cleaner Production, 233, p. 1182-1206, 2019. Review.

LILJENSTRÖM, C.; TOLLER, S.; ÅKERMAN, J.; BJÖRKLUND, A. **Annual climate impact and primary energy use of swedish transport infrastructure.** European Journal of Transport and Infrastructure Research, 19, n. 2, p. 77-116, 2019. Article.

LIU, G.; ZHANG, X.; QIAN, Z.; CHEN, L. *et al.* Life cycle assessment of road network infrastructure maintenance phase while considering traffic operation and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 422, 2023. Article.

LIU, Q.; WANG, Z.; ZHANG, N.; ZUO, J. *et al.* **Characterizing the impacts of highway pavement in a newly planned greater bay area economic belt in China.** *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021. Article.

LIU, Y.; LI, H.; WANG, H.; WANG, Y. *et al.* **Integrated Life Cycle Analysis of Cost and CO₂ Emissions from Vehicles and Construction Work Activities in Highway Pavement Service Life.** *Atmosphere*, 14, n. 2, 2023. Article.

MA, F.; DONG, W.; FU, Z.; WANG, R. *et al.* **Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China.** *Journal of Cleaner Production*, 288, 2021. Article.

MA, M.; LI, Z.; XUE, K.; LIU, M. **Exergy-based life cycle assessment model for evaluating the environmental impact of bridge: Principle and case study.** *Sustainability (Switzerland)*, 13, n. 21, 2021. Article.

MANTALOVAS, K.; DI MINO, G.; INZERILLO, L.; ROBERTS, R., 2021. **English, Exploiting 3D modelling and life cycle assessment to improve the sustainability of pavement management.** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 1471-1480. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091290738&doi=10.1007%2f978-3-030-48279-4_137&partnerID=40&md5=5aadf8234dce2770d89e213cf5e66d14https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091290738&doi=10.1007%2f978-3-030-48279-4_137&partnerID=40&md5=5aadf8234dce2770d89e213cf5e66d14.

MAO, R.; DUAN, H.; DONG, D.; ZUO, J. *et al.* **Quantification of carbon footprint of urban roads via life cycle assessment: Case study of a megacity-Shenzhen, China.** *Journal of Cleaner Production*, 166, p. 40-48, 2017. Article.

MARCILIO, G. P.; DE ASSIS RANGEL, J. J.; PEIXOTO, T. A. **Análise de emissões de gases do efeito estufa em um sistema de transporte de carga.** *Revista Produção Online*, 17, n. 2, p. 533-566, 2017.

MUHAMMAD FATIHI HAFIFI CHE WAHID, C.; ROZAID RAMLI, M.; AMINUDIN, E.; ZAINON NOOR, Z. *et al.*, 2019, English. **Review on the method for carbon footprint calculation of highway development.** Institute of Physics Publishing. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065449458&doi=10.1088%2f1757-899X%2f513%2f1%2f012001&partnerID=40&md5=0bf00e333ab6a277148eb28451eb5eda><https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85065449458&doi=10.1088%2f1757-899X%2f513%2f1%2f012001&partnerID=40&md5=0bf00e333ab6a277148eb28451eb5eda>.

OSORIO-TEJADA, J. L.; LLERA-SASTRESA, E.; SCARPELLINI, S. **Environmental assessment of road freight transport services beyond the tank-to-wheels analysis based on LCA.** *Environment, Development and Sustainability*, 2022. Article.

PASETTO, M.; PASQUINI, E.; GIACOMELLO, G.; BALIELLO, A., 2017, English, **Life-cycle assessment of road pavements containing marginal materials: Comparative analysis based on a real case study**. CRC Press/Balkema. 189-198. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029168533&doi=10.1201%2f9781315159324-20&partnerID=40&md5=650713da13c25dab7e24125f48d628a1https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029168533&doi=10.1201%2f9781315159324-20&partnerID=40&md5=650713da13c25dab7e24125f48d628a1>.

PELLECUER, L., 2016, English. **Influence of pavement maintenance strategy on road traffic social and environmental impacts and associated costs**. Transportation Association of Canada. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090524348&partnerID=40&md5=cd297bfe29302d5195a1d34e76ac6c8dhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090524348&partnerID=40&md5=cd297bfe29302d5195a1d34e76ac6c8d>.

PICARDO, A.; GALVÁN, M. J.; SOLTERO, V. M.; PERALTA, E. **A Comparative Life Cycle Assessment and Costing of Lighting Systems for Environmental Design and Construction of Sustainable Roads**. Buildings, 13, n. 4, 2023. Article.

PRATICÒ, F. G.; GIUNTA, M.; MISTRETTA, M.; GULOTTA, T. M., 2021, English, **Measuring the sustainability of transportation infrastructures through comparative life cycle and energy assessment**. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 1491-1499. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091275557&doi=10.1007%2f978-3-030-48279-4_139&partnerID=40&md5=3629a380d5d0353ae1d4d561aeb04553https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091275557&doi=10.1007%2f978-3-030-48279-4_139&partnerID=40&md5=3629a380d5d0353ae1d4d561aeb04553.

RENARD, S.; CORBETT, B.; SWEI, O. **Minimizing the global warming impact of pavement infrastructure through reinforcement learning**. Resources, Conservation and Recycling, 167, 2021. Article.

SANTOS, J.; BRESSI, S.; CERESO, V.; LO PRESTI, D. *et al.* **Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis**. Resources, Conservation and Recycling, 138, p. 283-297, 2018. Article.

SANTOS, J.; CERESO, V.; FLINTSCH, G.; FERREIRA, A., 2019, English, **A many-objective optimization model for sustainable pavement management considering several sustainability metrics through a multi-dimensionality reduction approach**. CRC Press/Balkema. 1451-1458. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063964352&partnerID=40&md5=3cc759f3c6413abc019cc5a9016b0e6fhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063964352&partnerID=40&md5=3cc759f3c6413abc019cc5a9016b0e6f>.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. **A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability.** *Journal of Cleaner Production*, 164, p. 1380-1393, 2017. Article.

SCHLEGEL, T.; PUIATTI, D.; RITTER, H. J.; LESUEUR, D. *et al.* **The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, p. 141-160, 2016. Article.

SECINARO, S.; CALANDRA, D.; PETRICEAN, D.; CHMET, F. **Social Finance and Banking Research as a Driver for Sustainable Development: A Bibliometric Analysis.** *Sustainability*, 13, n. 1, Jan 2021.

SOARES, P. B.; CARNEIRO, T. C. J.; CALMON, J. L.; CASTRO, L. O. D. C. D. O. **Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science.** *Ambiente Construído*, 16, p. 175-185, 2016.

TANG, H.; KUAI, H.; HUANG, X. **Energy consumption model for highway maintenance based on life cycle assessment.** *Dongnan Daxue Xuebao. (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 46, n. 3, p. 629-634, 2016. Article.

TORRES-MACHI, C.; NASIR, F.; ACHEBE, J.; SAARI, R. *et al.* **Sustainability Evaluation of Pavement Technologies through Multicriteria Decision Techniques.** *Journal of Infrastructure Systems*, 25, n. 3, 2019. Article.

UGOLINI, D.; BONASSI, S.; CRISTAUDO, A.; LEONCINI, G. *et al.* **Temporal trend, geographic distribution, and publication quality in asbestos research.** *Environmental Science and Pollution Research*, 22, n. 9, p. 6957-6967, May 2015.

WANG, H.; LIU, Y.; LI, J.; LIU, S. *et al.* **Environmental life cycle assessment of bridge deck pavement and case studies of two bridges in China.** *Case Studies in Construction Materials*, 18, 2023. Article.

WANG, T.; HARVEY, J.; KENDALL, A. **Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness.** *Environmental Research Letters*, 9, n. 3, 2014. Article.

YAO, L.; LENG, Z.; JIANG, J.; NI, F. **Large-Scale Maintenance and Rehabilitation Optimization for Multi-Lane Highway Asphalt Pavement: A Reinforcement Learning Approach.** *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23, n. 11, p. 22094-22105, 2022. Article.

ZHANG, J.; WNAG, J. J.; LIU, K. **Highway life-cycle cost analysis with environment impact considered.** *Chang'an Daxue Xuebao. (Ziran Kexue Ban)/Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 34, n. 3, p. 128-132, 2014. Article.

ZHONG, Y.; XU, S.; ZHANG, B.; CHENG, H. *et al.* **A study on carbon dioxide emissions of high-polymer road maintenance technology based on life cycle assessment evaluation.** Journal of Cleaner Production, 426, 2023. Article.

ZHU, D. L.; WANG, J.; GU, L. X., 2021, English, **Environmental Benefit Analysis of Hot Central Plant Recycling Asphalt Pavement Based on LCA.** IOP Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108648512&doi=10.1088%2f1755-1315%2f766%2f1%2f012101&partnerID=40&md5=bed0af5c28f9eb122d6457ffb9f6720a><https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108648512&doi=10.1088%2f1755-1315%2f766%2f1%2f012101&partnerID=40&md5=bed0af5c28f9eb122d6457ffb9f6720a>.