

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/358462013>

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

Conference Paper · February 2022

CITATIONS

0

READS

633

5 authors, including:



Marcela Krau

Federal University of Rio de Janeiro

9 PUBLICATIONS 4 CITATIONS

SEE PROFILE



Alexis Enríquez-León

Federal University of Rio de Janeiro

11 PUBLICATIONS 66 CITATIONS

SEE PROFILE



Francisco Thiago Sacramento Aragão

Federal University of Rio de Janeiro

101 PUBLICATIONS 1,052 CITATIONS

SEE PROFILE



Lucas Caldas

Federal University of Rio de Janeiro

117 PUBLICATIONS 677 CITATIONS

SEE PROFILE

AValiação DO CICLO DE VIDA (ACV) NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Marcela Maria Toscano Krau

Alexis Jair Enríquez-León

Francisco Thiago Sacramento Aragão

Programa de Engenharia Civil - PEC/COPPE

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Lucas Rosse Caldas

Departamento de Estruturas - FAU e Programa de Engenharia Civil - PEC/COPPE

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Romildo Dias Toledo Filho

Programa de Engenharia Civil - PEC/COPPE

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Luis Alberto Herrmann do Nascimento

CENPES/PETROBRAS

RESUMO

A pavimentação asfáltica pode ser considerada uma fonte relevante de gases do efeito estufa (GEE). O levantamento da quantidade de emissão desses gases ao longo desse processo produtivo possibilita a busca por alternativas menos nocivas ao meio ambiente. Uma revisão da literatura é fundamental para entendimento da temática e para o direcionamento de pesquisas no âmbito nacional. A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem sido aceita mundialmente pela indústria rodoviária para medir e avaliar o desempenho ambiental dos materiais e processos aplicados ao longo da vida útil do pavimento, a partir da identificação da intensidade de emissão de GEE, habitualmente denominada de “pegada de carbono”. Desta forma, o presente trabalho examina o estado da arte sobre ACV na pavimentação asfáltica a partir da Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Utilizando-se os bancos *Scopus*, *Web Of Science* e *Science Direct*, foram selecionados 37 artigos e no catálogo da CAPES 4 trabalhos entre dissertações ou teses, para os quais analisaram-se comparativamente os diferentes parâmetros adotados para a caracterização da ACV de pavimentos asfálticos. É possível concluir que, embora haja uma crescente preocupação da comunidade científica com a emissão dos GEE, as publicações nesse segmento são recentes e seriam favorecidas com padronização da unidade funcional para análises comparativas mais eficientes entre diferentes estudos. Ademais, existem poucas publicações nacionais direcionadas à pavimentação asfáltica, o que dificulta a utilização de ferramentas internacionais disponíveis de forma eficaz, já que não há bancos de dados específicos para adaptação às condições das rodovias, materiais e maquinários brasileiros.

ABSTRACT

Asphalt pavements can be considered a relevant source of greenhouse gases (GHG). The survey of the amount of emission of these gases throughout the production process enables research for alternatives that are less harmful to the environment. A literature review is essential for the understanding of the subject and to guide research in Brazil. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology has been accepted worldwide by the road industry to measure and assess the environmental performance of materials and processes applied throughout the service life of the pavement, based on the identification of the intensity of GHG emissions, usually called the “carbon footprint”. Thus, the present work examines the state-of-the-art of LCA for asphalt pavements based on a Systematic Literature Review (SLR). After filtering, 37 articles and four dissertations or theses were selected and analyzed comparatively for their different parameters that characterize LCA of asphalt pavements. It is possible to conclude that, although there is a growing concern of the scientific community with the emission of GHG, publications in this segment are recent and require a standardization of the functional unit to enable more efficient analysis between different studies. Furthermore, few Brazilian publications are aimed at asphalt pavements, making it difficult to use existing international tools effectively due to the lack of a specific database to facilitate the adaptation of such tools to the conditions of Brazilian highways, materials, and machinery.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas já demonstraram causar impacto generalizado nos sistemas humanos e no meio ambiente. Limitar o aquecimento global abaixo de 2°C (ou 1,5°C) e, em seguida, alcançar emissão zero, exigirá drásticas mudanças na emissão global dos GEE (IPCC, 2021).

O crescimento da preocupação com as questões ambientais já alcançou o âmbito legislativo, oficializando a necessidade de mudança e melhor percepção dos métodos construtivos quanto à emissão de gases poluentes e demais impactos ambientais. Isso torna essencial o mapeamento das possíveis medidas de mitigação e a identificação das ações que podem ser tomadas imediatamente e de quais exigirão prazos mais longos de implementação (Bataille *et al.*, 2016).

Devido à sua longa vida útil e aos métodos construtivos, os pavimentos rodoviários emitem gases do efeito estufa (GEE) durante todo o seu ciclo de vida. As emissões iniciam desde a extração e o processamento da matéria prima até as fases de construção, manutenção ou recuperação e fim de vida do pavimento (Muller *et al.*, 2013). A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com base na ISO 14040 (2006), possibilita o exame holístico dos potenciais impactos ambientais durante a vida de um produto, processo ou serviço.

Segundo o SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa), no período 1990-2015, as emissões globais cresceram, de forma quase contínua, mais de 35%, alcançando cerca de 55 bilhões de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (GtCO₂-eq). No Brasil, em 2019, no setor de energia, as emissões por produção ou uso de combustíveis alcançaram 413,7 MtCO₂-eq, sendo 47% devido ao setor de transportes. A produção de combustíveis foi responsável pela emissão de mais de 54,7 MtCO₂-eq, sendo o transporte de passageiros e cargas responsável por 94 e 101 MtCO₂-eq, respectivamente (SEEG, 2020). Percebe-se, assim, que grande parte dos dados relacionados às emissões de GEE se referem aos transportes, o que aumenta a necessidade da aquisição de dados nacionais específicos e atuais relacionados à emissão de GEE voltados à infraestrutura dos pavimentos, em especial o pavimento flexível, por ser o mais usual do país (CNT, 2017).

As maiores fontes de emissão direta na construção do pavimento são o consumo de combustíveis fósseis e o uso de outras fontes de energia, como eletricidade, devido às altas temperaturas de aquecimento dos agregados. O uso de outros materiais e o transporte de equipamentos de construção na fase de execução têm impactos menos significativos (CT, 2010; Wang *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2016; Alzard, 2019).

Diante desta realidade, o objetivo deste trabalho é entender o estado da arte sobre a aplicação da ACV na pavimentação asfáltica, com ênfase na emissão de GEE, a partir da análise de artigos, teses, dissertações, abordagens e ferramentas utilizadas, inclusive as fontes de pesquisa, revistas e editoriais. A partir deste estudo, realizou-se uma avaliação crítica da relação da ACV com a emissão de GEE na construção de pavimentos asfálticos.

2. METODOLOGIA

Utilizou-se a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que é um método científico explícito, abrangente e reprodutível, para identificar, avaliar e sintetizar o estado da arte de um tópico específico (Okoli, 2015). Similarmente, Galvão e Ricarte (2019) indicam este tipo de revisão como um documento relevante para tomada de decisão nos contextos públicos e privados em suas respectivas áreas de atuação.

A disposição e as especificações de cada fase do estudo estão ilustradas na Figura 1.

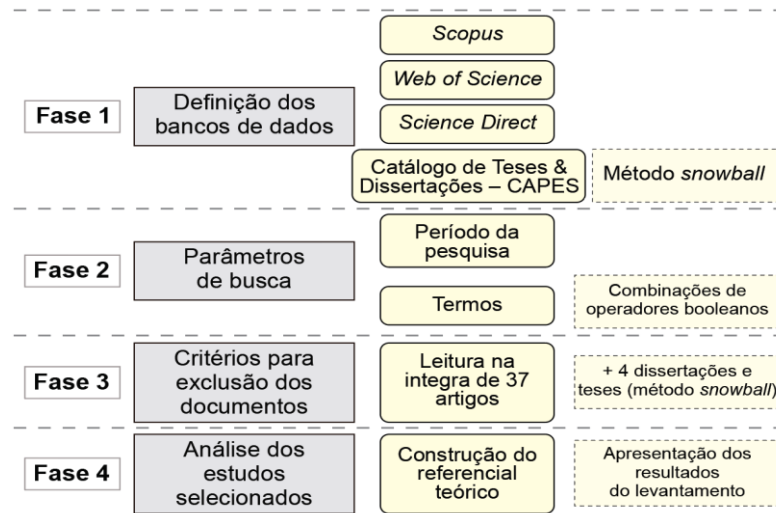


Figura 1: Estrutura da metodologia aplicada no estudo.

2.1. Fase 1: Definição dos bancos de dados

Foram estabelecidas as bases de dados como *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct* para esta pesquisa, por serem plataformas amplamente conceituadas, com reconhecimento internacional, e por possuírem revisão especializada (Mariano e Rocha, 2017). Também, para avaliar o contexto nacional da metodologia ACV na pavimentação, foi necessário incluir os repositórios institucionais das universidades brasileiras, com ênfase nos trabalhos de teses e dissertações, através do Catálogo de Teses & Dissertações - CAPES e utilizando o método de seleção snowball proposto por Goodman (1961).

2.2. Fase 2: Parâmetros de busca

Nesta etapa, os parâmetros de busca são introduzidos para limitar e otimizar os resultados. O alvo da busca foi definido como artigos completos de revistas, excluindo-se artigos de revisão, livros, capítulos de livros e resumos em congressos. O período de coleta dos dados foi definido sem restrição do ano de início, incluindo artigos publicados até maio de 2021.

Para a filtragem dos artigos, os seguintes termos de busca foram aplicados nas bases de dados, utilizando as combinações e operadores booleanos para o título, resumo e palavras-chave dos documentos: ((“pavement”) AND ((“life cycle assessment”) OR (“LCA”)) AND ((“sustainability”) OR ((“greenhouse gases”) OR (“GHG”)) OR ((“carbon footprint”))) NOT (“concrete”)), existindo uma ampla variedade de trabalhos, revistas e editoriais. Para o caso de trabalhos no âmbito nacional, foi utilizada a plataforma Catálogo de Teses & Dissertações - CAPES. Devido à reduzida quantidade de trabalhos nacionais encontrados, foram inseridos como parâmetros de busca nesta plataforma apenas os termos ((“pavimentos”) AND (“ACV”)).

2.3. Fase 3: Critérios para exclusão dos documentos

Vários critérios foram estabelecidos para a exclusão dos documentos obtidos na busca geral, tais como: i) documentos não escritos em inglês, ii) documentos pertencentes a revistas sem JCR de 2019 (*Journal Citation Reports*®) ou FI (fator de impacto), iii) revistas com JCR menor que 2,0, iv) registros duplicados, v) trabalhos sem relação direta com o tema e vi) avaliação crítica dos títulos e resumos, se necessário. Portanto, utilizaram-se apenas artigos completos sobre estudos de caso, comparação de metodologias, implementação de programas, etc., escritos em inglês, de revistas com JCR igual ou maior a 2,0. Para o contexto nacional, foram consideradas teses e dissertações encontradas no Catálogo de Teses & Dissertações - CAPES.

2.4. Fase 4: Análise dos estudos selecionados

Finalmente, nesta fase se apresentam os resultados do levantamento, criando um referencial teórico que será discutido criticamente no decorrer do artigo com as informações mais relevantes obtidas. Os diferentes critérios de análise abordaram os dados do artigo, como ano da publicação, país de origem, autores, palavras-chave, quantidade de citações, revista e seu respectivo JCR. Utilizou-se a versão 1.6.5 do *software VOSviewer* para a elaboração de mapas de calor e de redes de conexão. Quanto ao conteúdo, foram classificados os parâmetros de escopo mais frequentes (processamento de matéria-prima, construção, manutenção, reciclagem, descarte/demolição e uso), os fatores de impacto considerados (CO₂.eq, consumo energético, aquecimento global, destruição do ozônio estratosférico, entre outros).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia implementada, foram pré-selecionados 85 artigos da base *Scopus*, 95 do *Web Of Science* e 66 do *Science Direct*, obtendo-se um total de 246 artigos. Após aplicados os parâmetros de filtragem, foram descartados 209 artigos, resultando em 37 artigos selecionados que satisfizeram os critérios de refinamento e que posteriormente foram submetidos à leitura integral e detalhada para permitir análises aprofundadas dos aspectos relevantes.

A Figura 2 mostra a classificação da quantidade de artigos segundo suas revistas e o valor do JCR onde os artigos foram publicados. Percebe-se que aproximadamente 70% dos artigos estão concentrados em apenas três revistas, sendo elas *Journal of Cleaner Production*, *Resources, Conservation and Recycling* e *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Estas revistas estão entre as quatro com maiores fatores de impacto quanto ao JCR de 2019.

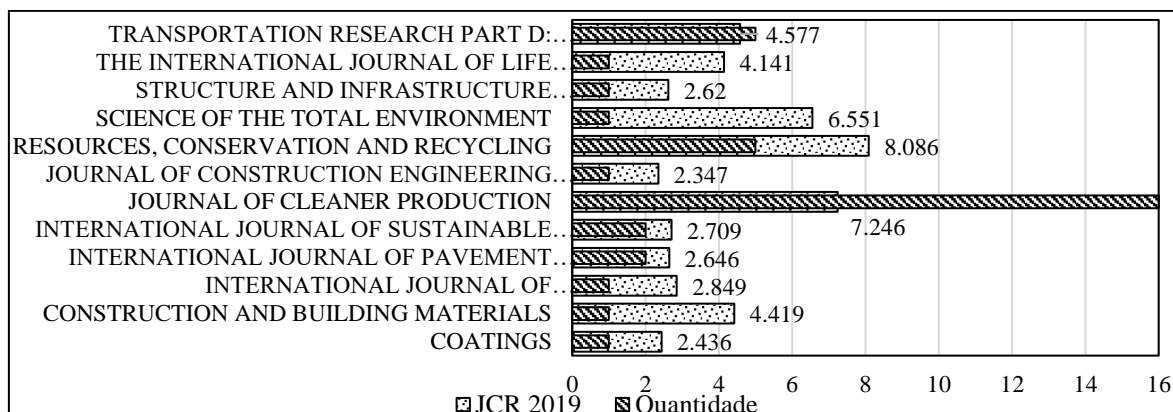


Figura 2: Classificação quanto ao número de publicações e JCR.

O número total das citações foi quantificado para cada trabalho segundo a revista de publicação, como observado na Figura 3. Aproximadamente 80% das citações ocorreu para três revistas, a saber: 563 para a *Journal of Cleaner Production*, 293 para a *Resources, Conservation and Recycling* e 234 para a *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

Neste conjunto, destacam-se os trabalhos de Huang *et al.* (2009a e 2009b), Cass e Mukherjee (2011), Aurangzeb *et al.* (2014), Giani *et al.* (2015) e Farina *et al.* (2017) pelo grande número de citações, em torno de 50% do total dos 37 trabalhos revisados. Essas pesquisas possuem alta

procura devido ao seu pioneirismo ou pelo alto impacto provocado na comunidade científica nos tópicos relacionados à ACV de pavimentos asfálticos.

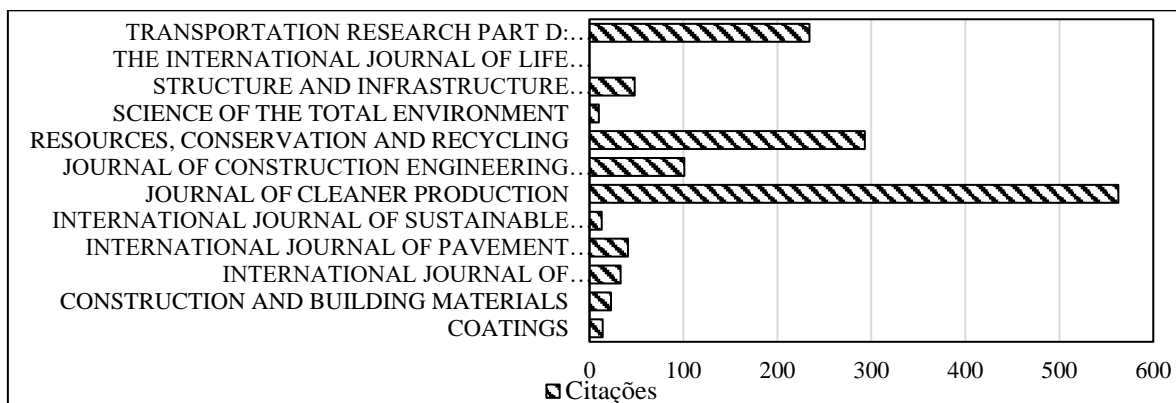


Figura 3: Número total de citações por trabalho.

O estudo de Huang *et al.* (2009b) é umas das primeiras pesquisas encontradas na literatura. Foram analisados recursos relevantes da ACV em todo o mundo na indústria rodoviária, identificando-se a lacuna de conhecimento e descrevendo o desenvolvimento de um modelo de ACV para construção e manutenção de pavimentação que inclui a reciclagem. O trabalho de Cass e Mukherjee (2011) aplica diferentes métodos já existentes de ACV, integra dados primários e faz comparações com projetos que utilizam inventários estimados, estabelecendo estratégias que reduzam os impactos ambientais a longo prazo. De características similares, foram encontrados os trabalhos de Huang *et al.* (2009a), Aurangzeb *et al.* (2014), Giani *et al.* (2015) e Farina *et al.* (2017), que apresentam avaliações da redução do CO₂-eq, práticas sustentáveis que podem ser adotadas, quantificações de consumo de energia, água utilizada durante o ciclo de vida, entre outros parâmetros, gerando um embasamento científico para as futuras pesquisas.

Quanto aos países que concentram o maior número de publicações, evidenciados na Figura 4, destacam-se China, Estados Unidos e Itália. Isso era esperado, especialmente para China e EUA, que possuem, respectivamente, 90 e 94% da malha rodoviária com o revestimento flexível (Asphalt Institute, 2014; Ma *et al.*, 2016), além da grande influência de ambos países 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, segundo o The World Bank (2011), a China produz 19% de toda as emissões do mundo e 50% das emissões da Ásia.

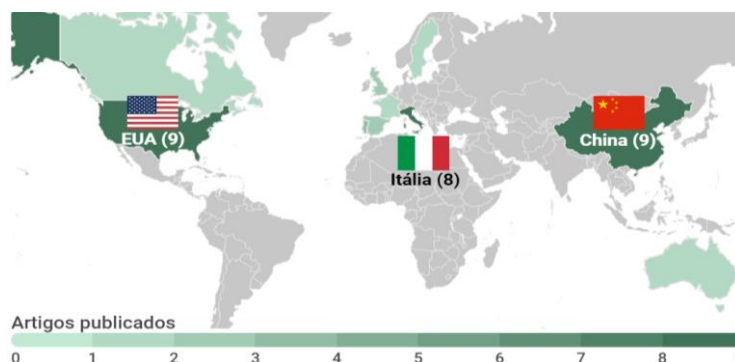


Figura 4: Número de publicações segundo o país de origem.

No Brasil, com os critérios estabelecidos, foram encontrados apenas quatro documentos, entre dissertações e teses, evidenciando-se a grande lacuna de conhecimento de ACV aplicada na pavimentação asfáltica nacional. Savietto (2017) comparou dois cenários de restauração, um com materiais virgens e outro com uma mistura asfáltica composta por RAP (*reclaimed asphalt pavement*), para medir os impactos ambientais produzidos através de diferentes bancos de dados (*GaBi e USLCI*) e métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida - AICV (*EDIP 1997 e TRACI*). Posteriormente, Karnikowski (2019) aplicou os processos de Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e ACV para seleção de metodologias de manutenção e reabilitação de pavimentos urbanos.

Santos (2011) realizou uma análise com abordagem probabilística no dimensionamento do pavimento, e enfatizou a importância da consideração da ACV para a tomada de decisão. Procedimentos com informações brasileiras foram desenvolvidos para sistemas de pavimentos aeroportuários baseados em ACCV e ACV (Nascimento, 2021).

A Figura 5 apresenta um mapa de calor gerado pelo *software VOSviewer* com a coautoria dos artigos selecionados, onde a tonalidade amarela representa maior número de publicações e é seguida por tonalidades esverdeada e azul. Destaca-se a falta de conexão entre os principais grupos de pesquisa e a grande concentração de trabalhos desenvolvidos pelos autores João Santos, Yue Huang e Hao Wang.

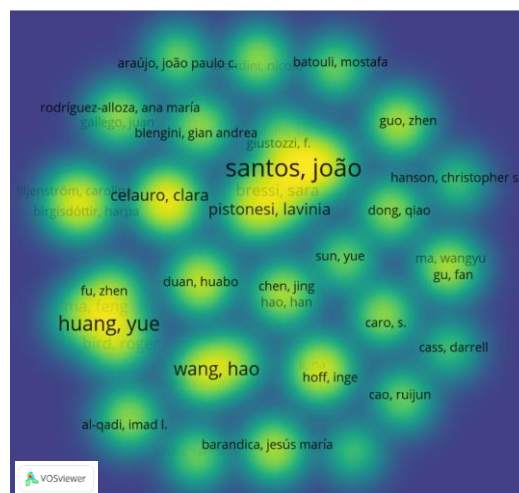


Figura 5: Mapa de calor de coautoria.

As Figuras 6 e 7a apresentam as fontes, organizadas pelo critério de acoplamento bibliográfico, ou seja, combinação de título e resumo, e palavras-chave, respectivamente. O critério de acoplamento bibliográfico procura aproximar unidades que compartilham referências em comum. Ou seja, quanto maior a coincidência de determinados veículos de publicação citados habitualmente, maior será a proximidade, a interconexão dos termos e maiores os “*labels*” representados por círculos. Neste procedimento, os *clusters* (grupos), identificados por cores, distinguem relações mais fortes dentro do conjunto de fontes selecionadas. Entre os termos assíduos no título e no resumo, destacem-se *energy consumption, use, reduction, greenhouse emission, case study e sustainability*. Nas palavras-chave, destaca-se o termo *life cycle assessment*, demonstrando a compatibilidade com os parâmetros booleanos que foram utilizados na seção 2.2, assim como de uma relação direta entre as Figuras 7a e 7b.

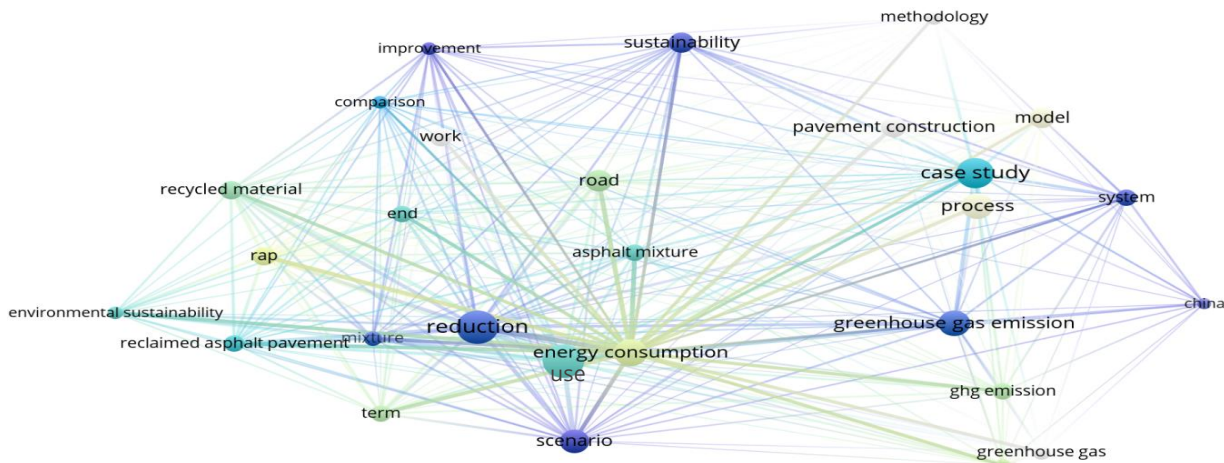


Figura 6: Rede de conexão dos termos assíduos no título e no resumo.

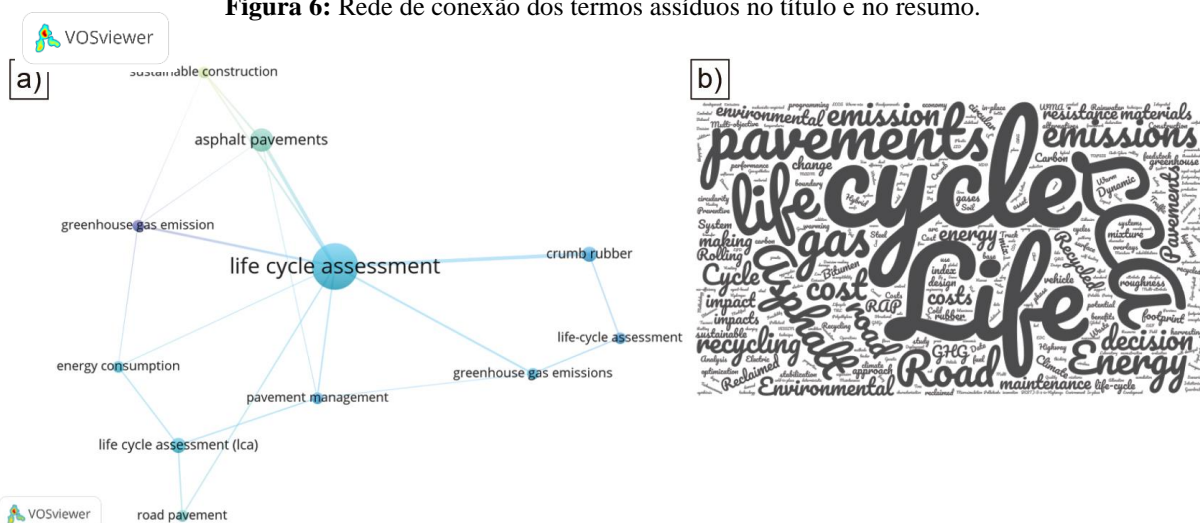


Figura 7: Termos assíduos nas palavras-chave em: a) rede de conexão e b) nuvem de palavras.

Tratando-se das etapas que são abordadas no escopo dos artigos selecionados, como mostra a Figura 8, foi identificado que as etapas de processamento da matéria-prima e de construção do pavimento têm destaque nas análises, possivelmente pela facilidade da obtenção de dados primários e secundários de tais etapas e devido ao número de publicações que já validaram a importância da influência do aquecimento do agregado nas emissões de GEE. Em contrapartida, as demais fases como manutenção, uso e fim de vida das rodovias estão sendo avaliadas em quantidade reduzida, como consequência da longa vida-útil do pavimento e das recentes tendências da aplicação da metodologia ACV no setor de transportes, resultando em bases de dados restritas.

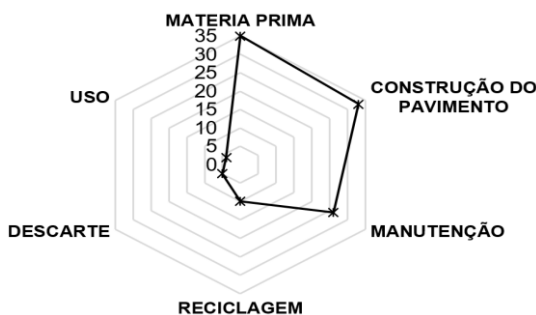


Figura 8: Distribuição quanto às etapas consideradas no escopo.

Finalmente, a Tabela 1 apresenta um resumo dos estudos encontrados, podendo servir como uma primeira fonte de consulta atualizada para pesquisadores e usuários da metodologia ACV interessados em estudar os impactos ambientais na pavimentação asfáltica. Nota-se preferência pela norma norte-americana em detrimento da norma europeia. Ademais, existe notória falta de unificação da unidade funcional, dificultando a comparação entre os resultados de diferentes estudos. Quanto ao Inventário do Ciclo de Vida (ICV), a base de dados é predominantemente de fonte secundária e se destacam os *softwares* GaBi, PaLaTe e SimaPro. Quanto às categorias de impacto, 78% utilizaram a avaliação quanto à emissão de GEE, 64,8% utilizaram o consumo energético e poucos estudos apresentaram os demais impactos sugeridos na norma vigente.

Tabela 1: Resumo das principais variáveis envolvidas na ACV na pavimentação asfáltica.

Autor	Norma	Unidade Funcional		Inventário de Ciclo de Vida		Categoria de Impacto
		Comp.	Nº de Faixas	Base de Dados	Software	
Huang <i>et al.</i> (2009a)	ISO (a)	2,6 km	2	P, S	-	C.E, GEE
Huang <i>et al.</i> (2009b)	ISO (a)	30 000 m ²	-	P	-	C.E, GEE, outros
Cass e Mukherjee (2011)	-	-	-	S	FieldManager	GEE
Aurangzeb <i>et al.</i> (2014)	ISO (a), (b)	1,6 km	-	S	-	C.E, GEE
Araújo <i>et al.</i> (2014)	ISO (a), (b)	1 km	2	S	-	C.E, GEE
Santos <i>et al.</i> (2015)	ISO (a)	-	-	S	-	C.E, GEE
Santos <i>et al.</i> (2015)	-	5,89 km	2	S	-	C.E, GEE
Giani <i>et al.</i> (2015)	EN 15804, ISO (a), (b)	1 km	4	P, S	SimaPro	C.E, GEE, outros
Celauro <i>et al.</i> (2015)	ISO (a), (b)	1 km	2	S	PaLaTe	C.E, GEE
Hasan & You (2015)	-	1 km	2	S	SimaPro	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	NONROAD	GEE
Fernandez-Sanchez <i>et al.</i> (2015)	-	-	-	S	CO2TRUCT	GEE
Ma <i>et al.</i> (2016)	-	20 km	4	S	-	C.E, GEE
Santos <i>et al.</i> (2017)	ISO (a), (b)	-	-	S	-	GEE
Celauro <i>et al.</i> (2017)	ISO (a), (b)	1 km	2	S	PaLaTe	C.E, GEE, outros
Chen <i>et al.</i> (2017)	-	-	-	S	-	C.E, GEE
Farina <i>et al.</i> (2017)	ISO (a)	1 m	-	P, S	SimaPro	C.E, GEE, outros
Guo <i>et al.</i> (2017)	ISO (a), (b)	1 km	-	S	SimaPro	C.E, GEE
Batouli <i>et al.</i> (2017)	-	12 pés	4	S	PaLATE, PE-2, EIO-LCA, SimaPro	GEE
Bressi <i>et al.</i> (2018)	ISO (b)	1 km	4	S	GaBi	C.E, GEE
Yu <i>et al.</i> (2018)	-	-	-	S	-	C.E
Moretti <i>et al.</i> (2018)	EN 15804	1 m	2	S	-	C.E, GEE, outros
Chen e Wang (2018)	-	200 pés	-	S	NONROAD	GEE
Cao <i>et al.</i> (2019)	ISO (a), (b)	1 m ²	-	S	-	C.E, GEE
Puccini <i>et al.</i> (2019)	ISO (b)	400 e 464,5 m	2	S	SimaPro	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)	ISO (a)	-	-	S	-	C.E, GEE
Bressi <i>et al.</i> (2021)	ISO (a), (b)	1 km	4	P, S	GaBi	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)	ISO (a), (b)	1 km	1	S	-	C.E, GEE
Huang <i>et al.</i> (2021)	ISO (a)	5 km	4	S	-	C.E, GEE, outros
Ma <i>et al.</i> (2021)	ISO (a)	22 500 m ²	3	S	-	C.E, GEE
Chen <i>et al.</i> (2021)	-	1,6 km	2	S	NONROAD	C.E, GEE, outros
Santos <i>et al.</i> (2021)	EN 15804, ISO (a), (b)	1 km	-	P, S	AusLCI	Outros

P: Dados de base primária; **S:** Dados de base secundária; **ISO (a):** ISO 14040; **ISO (b):** ISO 14044; **C.E:** Consumo Energético; **GEE:** Gases do Efeito Estufa.

Observa-se que a temática ganhou mais destaque na última década, concentrando-se a maior parte das publicações nos últimos 5 anos. Também se destaca o fato de que as publicações mais antigas datam de 2009, ou seja, são relativamente recentes, considerando que a pavimentação é uma temática difundida no âmbito acadêmico e a metodologia ACV foi normalizada internacionalmente em 1997 e atualizada em 2006 (ISO 14040, 2006).

Considerando estudos de mesma unidade funcional, com comprimento de 1 km e duas faixas de largura, Celauro *et al.* (2015) e Celauro *et al.* (2017) avaliaram os processos de manutenção e de construção do pavimento, respectivamente, e evidenciaram a importância da incorporação de RAP e da estabilização do solo com cal, alcançando redução de consumo energético e de emissão de GEE de 34% e 45%, respectivamente. Hasan & You (2015) compararam misturas asfálticas quentes, misturas mornas com espuma com água (WWMA) e misturas mornas com espuma com etanol (EWMA). Todas apresentaram demanda energética e emissão de CO₂ mais expressiva durante a fase de construção, seguida da fase de manutenção e, por fim, de transporte, sendo a EWMA a mistura de menor emissão, resultando em uma redução de 9,13% comparada às misturas quentes. Araújo *et al.* (2014) utilizaram diferentes proporções de RAP, obtendo variação de consumo energético e emissão de GEE inversamente proporcional à porcentagem de material reciclado. Entre as fases de vida do pavimento, a etapa de produção de mistura resultou em maior consumo energético e emissão de GEE.

Fernández-Sánchez *et al.* (2015) discutiram alternativas relevantes para a redução de emissões, também encontradas em outros estudos na RSL. Estas incluem uso de biocombustíveis, avanços no dimensionamento e na construção do pavimento, otimizando sua durabilidade (Yu *et al.*, 2018), aplicação de misturas mornas ou frias (Alloza *et al.*, 2015; Giani *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015) e utilização de misturas alternativas, como as que incorporam RAP (Bressi *et al.*, 2021), polímeros (Araújo *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2021) e borracha (Puccini *et al.*, 2019).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a revisão sistemática da literatura (RSL), a partir das bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* e o Catálogo de Teses & Dissertações - CAPES, foram avaliados 37 artigos e quatro pesquisas, entre dissertações ou teses. A partir desta análise, foram identificados os principais parâmetros da ACV para a pavimentação asfáltica.

Notou-se um crescente interesse na comunidade internacional pelo tópico nos últimos anos, além da dificuldade de uniformização da unidade funcional, prejudicando a análise comparativa entre diferentes estudos. Existe uma ampla predominância da utilização de dados secundários, o que se justifica pela dificuldade da obtenção de dados para todas as etapas envolvidas no processo. Foram observadas diferentes limitações na ACV para pavimentação asfáltica brasileira, como baixa quantidade de publicações no tópico e poucos centros de pesquisa específicos estudando o assunto.

Os impactos relacionados à emissão de GEE e ao consumo de energia foram os mais avaliados, sendo o aquecimento dos agregados das misturas a quente uma das atividades mais impactantes.

Sugere-se a aplicação da ACV em pesquisas mais completas e a definição de unidades funcionais mais uniformizadas, assim como estudos de casos para diferentes regiões do Brasil,

apoiados por órgãos nacionais. Ressalta-se a importância desse tipo de estudo de RSL para auxiliar tanto em novos trabalhos quanto aos tomadores de decisão para políticas públicas.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Institute. (2014). How many of our U.S. roads are paved with asphalt? Disponível em: <http://asphaltmagazine.com/wp-content/uploads/2016/11/pavedroad_infographic.pdf>
- Alzard, M.H., Maraqa, M.A., Chowdhury, R., Sherif, M., Mauga, T.I., De Albuquerque, F.B. & Aljunadi, K.N. (2019) RoadCO2: A web-based tool for estimation of greenhouse gas emissions of road projects. *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICASET.2019.8714341.
- Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M. & Silva, M. R. D. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 32, pp. 97-110. DOI: 10.1016/j.trd.2014.07.006.
- 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.
- Bataille, C., Waisman, H., Colombier, M., Segafredo, L., Williams, J., & Jotzo, F. (2016). The need for national deep decarbonization pathways for effective climate policy. *Climate Policy*, vol. 16(S1), pp. S7-S26. DOI: 10.1080/14693062.2016.1173005.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Confederação Nacional do Transporte (CNT). *Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?*. CNT, Brasília, 2017.
- CT Carbon Trust Industrial. *Energy efficiency accelerator: guide to the asphalt sector*. London, England; 2010.
- Do Nascimento, F. A. *Alguns aspectos operacionais e ambientais incorporados a um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários: Uma contribuição metodológica à luz da análise do ciclo de vida*. Tese de Doutorado. UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Goodman, L.A. (1961) Snowball sampling. *The annals of mathematical statistics*, vol. 32(1), pp. 148-170. DOI: 10.1214/aoms/1177705148.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland. Cambridge University Press.
- International Organization For Standardization (ISO). (2006). ISO 14040:2006. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Geneva, Switzerland.
- 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.
- Karnikowski, T. *Seleção de estratégias de manutenção e reabilitação de pavimentos urbanos baseada na análise do custo do ciclo de vida*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2019.
- Liljenström, C., Miliutenko, S., O’Born, R., Brattebø, 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Mariano, A. M., & M. S. Rocha. (2017). Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. *AEDEM Internacional Conference - Economy, Business and Uncertainty: Ideas for a European and Mediterranean industrial policy*, vol. XXVI, Reggio Calabria, Itália.
- 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.
- 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.
- Müller, D. B., Liu, G., Løvik, A. N., Modaresi, R., Pauliuk, S., Steinhoff, F. S., & Brattebø, H. (2013) Carbon emissions of infrastructure development. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47(20), pp. 11739-11746. DOI: 10.1021/es402618m.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rodríguez-Alloza, A. M., Malik, A., Lenzen, M., & Gallego, J. (2015). Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, vol. 90, pp. 171-182. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.035.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). (2020). *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019*.
- The World Bank, 2011. *Transport - Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation: a Toolkit for Developing Countries*. World Bank, Washington, DC.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.