

## Análisis del Ciclo de Vida en pavimentos flexibles para la disminución de CO<sub>2</sub>: Revisión Sistemática

Ing. Juan Diego Flores Ruiz <sup>A</sup>, Dr. Marco Antonio Montoya Alcaraz <sup>B</sup>, Dr. Leonel Gabriel García Gómez <sup>C</sup>.

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Baja California, diego.flores50@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México <sup>A</sup>.

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Baja California, marco.montoya@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México <sup>B</sup>.

<sup>c</sup> Universidad Autónoma de Baja California, Leonel.garcia@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México <sup>C</sup>.

### Resumen

El desarrollo del sistema vial es inevitable debido al rápido crecimiento económico, sin embargo, en la actualidad se ha convertido en un tema de gran preocupación; debido a los graves impactos ambientales que genera la expansión de las carreteras. Para lograr los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), las políticas y acciones en materia de gestión de pavimentos deben evaluarse cuidadosamente. La literatura actual plantea como una solución a dicha problemática el Análisis del Ciclo de Vida, debido a que es una herramienta metodológica que facilita a las instituciones administradoras de las vías a escoger la estrategia técnico económico que proveerá el comportamiento deseado del pavimento al menor costo y con menor impacto ambiental.

Derivado de lo anterior, el propósito de esta investigación es identificar las estrategias utilizadas en la literatura actual utilizando la metodología PRISMA-SCR para estimar la cantidad de emisiones generadas por las diferentes etapas del ciclo de vida del pavimento, así como actividades generadoras de emisiones y las diferentes medidas de mitigación utilizadas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se determinó que las etapas de producción, uso y fin de vida de los materiales son las que más emisiones generan, debido a las diversas actividades que la constituyen cada una de ellas. Además, se identificaron las medidas de mitigación que ofrecen mejores resultados en la disminución de emisiones; la implementación de estrategias viales para evitar la congestión vehicular y el reciclaje de los residuos generados para su posterior aprovechamiento como agregados en el diseño y construcción de nuevos pavimentos.

**Palabras clave**— Vialidad, LCA, Asfalto, Dióxido de Carbono.

### Abstract

The development of the road system is inevitable due to the rapid economic growth, however, at present it has become a matter of great concern; due to the serious environmental impacts generated by the expansion of highways. To achieve the sustainable development goals (SDGs), pavement management policies and actions need to be carefully evaluated. The current literature proposes the Life Cycle Analysis as a solution to this problem, since it is a methodological tool that makes it easier for road management

institutions to choose the technical-economic strategy that provides the desired behavior of the pavement at the lowest cost and with less environmental impact.

Derived from the above, the purpose of this research is to identify the strategies used in the current literature using the PRISMA-SCR methodology to estimate the number of emissions generated by the different stages of the pavement life cycle, as well as activities that generate emissions and the different mitigation measures used to reduce CO<sub>2</sub> emissions. It was determined that the stages of production, use and end of life of the materials are the ones that generate the most emissions, due to the various activities that constitute each of them. In addition, the mitigation measures that offer the best results in reducing emissions were identified; the implementation of road strategies to avoid traffic congestion and the recycling of waste generated for its later use as aggregates in the design and construction of new pavements.

**Keywords**— Roads, LCA, Asphalt, Carbon Dioxide.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos flexibles están compuestos de una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre una serie de capas estructurales de diferentes dimensiones y características [1].

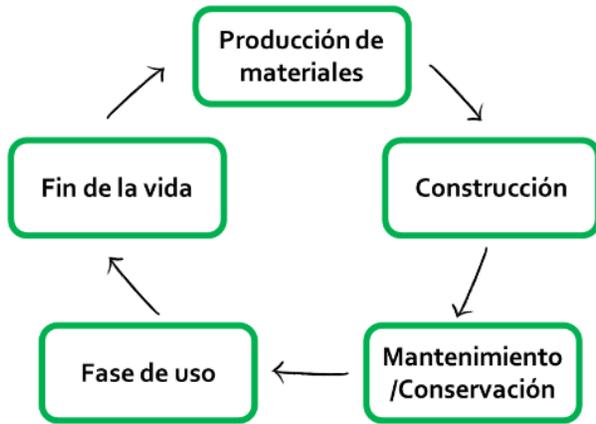
A nivel nacional, el aumento de las importaciones y exportaciones ha hecho del fortalecimiento de la infraestructura vial una política de gobierno, sin considerar los impactos ambientales derivados de la construcción y generados durante la vida útil de los pavimentos en uso. Por ende, con el rápido crecimiento de los proyectos de pavimentación construidos a lo largo de los años, el medio ambiente se enfrenta a problemas de sostenibilidad, como las emisiones nocivas y contaminantes (el CO<sub>2</sub>, el SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub>, los HC, las partículas de hollín y los metales pesados, los CFC y el CH<sub>4</sub>), el consumo adicional de combustible y la contaminación acústica.

Por lo tanto, el Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) es una herramienta integral para ayudar a las partes interesadas del proyecto a gestionar los aspectos ambientales del pavimento y alcanzar los objetivos de construcción de pavimento sostenible, donde un estudio ha demostrado que avanzar hacia el desarrollo sostenible en proyectos de construcción de pavimentos puede llevar a reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [2]. Es importante mencionar que el CO<sub>2</sub> es la emisión más representativa y dañina con respecto a los GEI [3]. Debido a que se reconoce el gran impacto ambiental por medio de la producción de materiales, construcción, fase de uso; mantenimiento/conservación y fin de vida; es necesario realizar una revisión sistemática de buenas prácticas en casos de estudio para identificar las actividades del ciclo de vida de los pavimentos que producen mayor cantidad de emisiones y las medidas de mitigación establecidas para reducir la cantidad de CO<sub>2</sub>.

El Análisis del Ciclo de Vida (LCA) proporciona un enfoque integral para evaluar la carga ambiental de un determinado producto o proceso, el cual permite saber dónde están las

etapas o elementos más críticos del proceso para enfocarse en ellas y buscar soluciones alternativas. Esto también contribuye a promover una producción más sostenible a través del acceso ambiental. Esta metodología se ha utilizado para el análisis de los pavimentos y sus efectos medio ambientales. Dicho análisis, examina todas las entradas de materiales y/o energía utilizada y salidas de emisiones contaminantes durante el ciclo de vida de una vía, desde la producción de materia prima hasta el final de su vida útil [4, 5]. El ciclo de vida de los pavimentos se divide en cinco etapas, producción de materiales, construcción, fase de uso, mantenimiento/conservación y fin de vida.

Fig. 1. Fases del ciclo de vida del pavimento.



Fuente: [4].

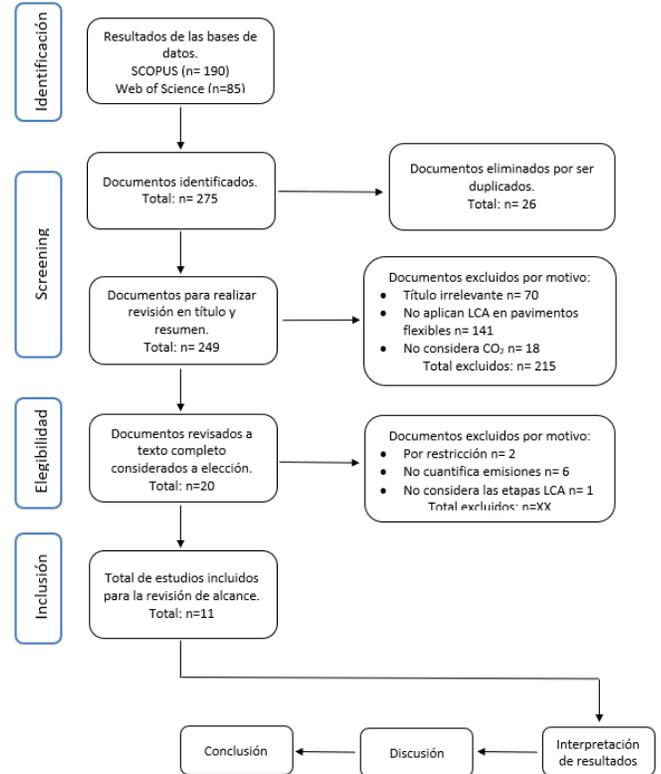
Cada etapa consta de diferentes componentes, cada uno de los cuales representa una interacción única entre el pavimento y el medio ambiente, estos componentes representan los procesos inmediatos por los cuales el pavimento afecta el medio ambiente.

## 2. CONTENIDO

### 2.1 Métodos

El siguiente estudio consiste en una Revisión Sistemática de Literatura (SLR), que es una metodología para recopilar datos secundarios de diferentes fuentes y analizarlos de acuerdo con el alcance del estudio. Durante la SLR se debe definir el protocolo o plan del estudio, donde se establecen los criterios de selección de los documentos publicados a revisar antes de realizar el proceso de revisión. La metodología de esta revisión sistemática consta de cuatro fases para lograr el objetivo de la investigación, que fue examinar la literatura existente realizada sobre LCA para proyectos de pavimento e ilustrar cómo LCA afectan diferentes aspectos de los proyectos de pavimento y aseguran la sostenibilidad durante la toma de decisiones. Se llevo mediante la identificación del problema, se estableció el objetivo donde se realizó una revisión bibliográfica general para su posterior análisis e interpretación de los resultados [6]. El diagrama de flujo para la declaración PRISMA se muestra en la Figura 2.

Fig. 2. Diagrama de flujo de la estrategia de búsqueda.



Fuente: Elaboración propia.

### 2.2 Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica más reciente se llevó a cabo el día 18 de noviembre del 2022 en las siguientes bases de datos: SCOPUS y Web of Science. Se creó una lista de términos de búsqueda para llevar a cabo la revisión: CO<sub>2</sub>, dióxido de carbono, pavimento, caminos, vialidad, asfalto, autopista, calle, carretera, LCA y análisis del ciclo de vida. Los términos fueron agrupados en tres bloques y se utilizaron para crear las cadenas de búsqueda genéricas usando operadores AND y OR, estas fueron adaptadas basándose en la guía de las diferentes bases de datos. La adaptación consistió en utilizar diferentes filtros, tales como, año, tipo de publicación, idioma y área temática, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 1. Términos.

CO <sub>2</sub>	Pavimento	ACV
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dióxido de carbono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camino</li> <li>• Vialidad</li> <li>• Asfalto</li> <li>• Autopista</li> <li>• Calle</li> <li>• Carretera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis del Ciclo de Vida</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Cadena de búsqueda en base de datos.

Genérica	Adaptada (SCOPUS)
(co2) OR (carbon W/1 dioxide) AND (pavement OR roads OR roads OR asphalt OR highway OR street OR road) AND ("life cycle analysis" OR lca)	TITLE-ABS-KEY (( (co2) OR (carbon W/1 dioxide) ) AND ( pavement OR roads OR roads OR asphalt OR highway OR street OR road ) AND ( "life cycle analysis" OR lca ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE, "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"cp" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENGI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENVI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "MATE" ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR,2021) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2020) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2019) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2018) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2017) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2016) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2013) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2012) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2011) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE, "English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE, "Spanish" ) )

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Estudios que presenten aplicación del LCA en pavimentos flexibles publicados en revistas de investigación y publicaciones científicas de congresos en el área de ingeniería, medio ambiente y ciencia de los materiales en idioma español e inglés.
- Estudios que presenten la aplicación del LCA en pavimentos flexibles publicados en el periodo del 2011 al 2021.
- Criterios de exclusión:
- Estudios que presenten la aplicación del LCA en pavimentos rígido.
- Todos los documentos que se consideren literatura gris: patentes, informes (científicos y técnicos), tesis doctorales, posters y reportes.

### 2.4 Selección de estudio/fuente de evidencia

Una vez ya realizada la búsqueda, los artículos identificados se descargaron en formato RIS y se subieron en el manejador de documentos Rayyan para la gestión, valoración y revisión eficiente de la información [7], en la cual se procesaron y eliminaron los duplicados.

Enseguida, se realizará la examinación de título y abstracts para determinar cuáles no cumplen con los criterios de inclusión de la aplicación del LCA en pavimentos flexibles.

Por último, se realizará la lectura a texto completo de los artículos aceptados en la etapa de examinación de título y resumen.

Para llevar a cabo la extracción de datos que nos ayudara a responder la pregunta de investigación de esta revisión de alcance. Este proceso se muestra en la figura 2.

### 2.5 Extracción de datos

- Se extrajo la siguiente información:
- Información bibliográfica: Año de publicación.

- Afectaciones en cada etapa.
- Porcentajes pertenecientes de CO2 durante el ciclo de vida del pavimento.
- Medidas de mitigación.
- Porcentaje de reducción de CO2.

Se elaboro una tabla comparativa para mostrar la información recopilada donde se indica las diferentes etapas pertenecientes al análisis del ciclo de vida del pavimento, las afectaciones que aumentan las emisiones de CO2, los porcentajes pertenecientes de CO2 en cada etapa del ciclo de vida del pavimento, medidas de mitigación impuestas para reducir las emisiones de CO2 y los porcentajes de reducción de CO2 obtenidos después de aplicar las medidas de mitigación.

### 2.6 Resultados.

Al ingresar la cadena de búsqueda en las dos bases de datos con los filtros correspondientes, se obtuvieron la siguiente cantidad de documentos:

SCOPUS: 190

Web of Science: 85

Una vez importados los datos de la búsqueda al manejador de documentos, se eliminaron 26 por ser duplicados, quedando un total de 249 para filtrado posterior. Al finalizar la revisión de título y resumen quedo un total de 20 artículos científicos para la revisión a texto completo. Esta información se encuentra resumida en la figura 2.

La tabla 3 muestra que las afectaciones presentes en las distintas etapas del ciclo de vida del pavimento flexible provocan el desprendimiento de emisiones de CO2 por lo tanto se toma medidas de mitigación con la finalidad de reducir el porcentaje de CO2 de las atapas.

Tabla 3. Cuadro comparativo de los artículos científicos.

Etapas ACV	Actividades que producen CO <sub>2</sub>	Porcentaje perteneciente de CO <sub>2</sub> en el ACV	Medidas de mitigación	Porcentaje de reducción de la etapa	Fuente de información
Producción de Materiales	Gran distancia de transporte	86% - 87%	Fabricantes más cercanos, implementar transporte sostenible y plantas alimentadoras con electricidad.	25% - 52%	[8 - 8]
	Plantas alimentadas con diésel				
	Maquinaria todo terreno				
Construcción	Retrasos de tráfico	63%	Se estableció una ruta alterna para no congestionar el tráfico, se cambió la organización de la construcción de la maquinaria con respecto a los rendimientos.	20% - 20.88%	[7, 9 - 13]
	Combustible utilizado				
	Movimiento de tierra (maquinaria pesada)				
Fase de Uso	Macrotextura	62% - 73%	Implementación de estrategias viales para evitar el congestionamiento vehicular, la adaptabilidad de pavimentos de color más claro por el efecto del albedo y el mejoramiento en la estructura y aspereza en el diseño del pavimento.	19.10%	[7, 8, 14]
	Albedo				
	IRI				
	Rugosidad				
Mantenimiento	Traffic	10.2% - 12%	Utilización de mezclas asfálticas tibias.	7.6% - 9.8%	[10, 14, 15]
	Reparación de baches				
Fin de Vida	Trabajo de fresado	71%	Camiones propulsados por fuentes de energía eléctrica, adopción de tecnología de captura y almacenamiento de carbono, reciclaje de residuo generados para su posterior uso de los desechos sólidos.	50%	[8, 13]
	Trabajo de recubrimiento				
	Eutroficación, ecotoxicidad y alteración del hábitad				
	Trituración de caminos				
	Disposición inadecuada de los residuos				
	Traslado de los residuos				

Fuente: Elaboración propia.

## 2.7 Discusión

Se determinó que al implementar el LCA en los pavimentos flexibles se logra disminuir la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, asimismo, se identificaron las diferentes actividades que generan emisiones y el establecimiento de estrategias de mitigación para reducir las emisiones contaminantes. Sin embargo, inclusión de nuevas palabras clave, así como modificar los criterios de inclusión, permitirán la identificación de nuevos hallazgos y su posible aplicación en casos de estudio, siendo esta un área de oportunidad para futuras publicaciones.

Las actividades que generaron más emisiones es la gran distancia de transporte del material y las plantas alimentadoras (producción de materiales), tráfico (fase de uso), eutroficación, ecotoxicidad y alteración del hábitat, el traslado y mala disposición inadecuada de los residuos (fin de vida), en el cual los porcentajes pertenecientes de CO<sub>2</sub> en el LCA variaban dependiendo la etapa debido a que fueron realizadas por diferentes entornos que considero cada autor.

Las medidas de mitigación con más contribución para reducir la cantidad de emisiones se encuentra en la etapa “fin de vida” que es el reciclaje de residuos generados para su posterior uso de los desechos sólidos que son llevados a cabo para ponerlos a disposición nuevamente en un pavimento, donde se evita las emisiones que se generan en la etapa “producción de materiales” debido a que se utilizaran parte de los residuos generados.

## 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó una revisión sistemática de la literatura en artículos de investigación, documentos de conferencias y artículos de revisión. Se adoptó la metodología PRISMA para la evaluación de los datos extraídos de dos bases de datos SCOPUS y Web of Science. El estudio se centra en la aplicación de LCA en diversos casos de estudio para la mejora de las estrategias de diseño y gestión de pavimentos. Se identificaron los resultados que ofrecen las mejores prácticas en materia de desempeño ambiental y económico. Asimismo, se destaca la interconexión entre las etapas de planeación y mantenimiento debido a que una buena gestión en estas etapas puede reducir significativamente los costos y emisiones contaminantes. Se concluye que mediante la implementación del análisis del ciclo de vida en los pavimentos flexibles es posible reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Dicha reducción es viable mediante la incorporación de medidas para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, en la etapa de producción de materiales, al utilizar fabricantes más cercanos, la implementación de transporte sostenible y plantas alimentadoras con electricidad; es posible reducir un 25% a 52% las emisiones. En la etapa fin de vida del pavimento, al utilizar tecnología de captura y almacenamiento de carbono y el reciclaje de residuos generados para su posterior uso de desechos sólidos; pueden reducir un 59% las emisiones generadas en esta etapa. Los porcentajes anteriormente mencionados se muestra en la tabla 3, misma que contiene las distintas etapas que constituyen el ciclo de vida y los rangos de porcentaje de reducción una vez implementadas las

medidas de mitigación. Es importante destacar que, para llevar a cabo medidas de mitigación, se deben identificar las actividades que provocan el desprendimiento de emisiones. Así como, su cuantificación a lo largo de la vida del pavimento. Lo anterior, con la finalidad de reducir el impacto ambiental que se refleja en el ciclo de vida del pavimento desde la producción de materiales hasta el fin de su vida.

## 4. REFERENCIAS

- [1] Araujo, Marcelo Almeida; et. al. Análisis comparativo de los métodos de suelo pavimento duro (hormigón) x flexible (asfalto). Revista científica multidisciplinaria base de conocimiento. Año 01, edición 11, vol. 10, pp. 187-196, noviembre de 2016. ISSN: 2448-0959.
- [2] Chiu, C. T., Hsu, T. H., & Yang, W. F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, conservation and recycling*, 52(3), 545-556.
- [3] Khalil, M. A. K. (1999). Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in the atmosphere. *Annual Review of Energy and the Environment*, 24(1), 645-661.
- [4] Harvey, J., Meijer, J., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Saboori, A., & Kendall, A. (2016). Pavement life cycle assessment framework (No. FHWA-HIF-16-014). United States. Federal Highway Administration.
- [5] Muench, S., and T. Van Dam. 2015. Climate Change Adaptation for Pavements. Tech Brief. FHWA-HIF-15-015. Federal Highway Administration. Washington, DC.
- [6] Peters, M. D., Godfrey, C. M., McInerney, P., Soares, C. B., Khalil, H., & Parker, D. (2015). The Joanna Briggs Institute reviewers' manual 2015: methodology for JBI scoping reviews.
- [5] Mourad Ouzzani, Hossam Hammady, Zbys Fedorowicz, and Ahmed Elmagarmid. Rayyan — a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews* (2016) 5:210, DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4.
- [6] 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*, 297, 126659.
- [7] 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*, 91, 102697.
- [8] Pantini, S., Borghi, G., & Rigamonti, L. (2018). Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology. *Waste Management*, 80, 423-434.
- [9] Barandica, J. M., Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Delgado, J. A., & Acosta, F. J. (2013). Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects. *Journal of cleaner production*, 57, 79-91.
- [10] Liu, Y., Wang, Y., & An, D. (2018). Life-cycle CO<sub>2</sub> emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China.

International Journal of Sustainable Transportation, 12(7), 497-509.

[11] Li, D., Wang, Y., Liu, Y., Sun, S., & Gao, Y. (2020). Estimating life-cycle CO<sub>2</sub> emissions of urban road corridor construction: A case study in Xi'an, China. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120033.

[12] Zhang, Y., Gong, H., Jiang, X., Lv, X., Xiao, R., & Huang, B. (2021). Environmental impact assessment of pavement road bases with reuse and recycling strategies: A comparative study on geopolymer stabilized macadam and conventional alternatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102749.

[13] Li, H., Deng, Q., Zhang, J., Olubunmi Olanipekun, A., & Lyu, S. (2019). Environmental impact assessment of transportation infrastructure in the life cycle: Case study of a fast-track transportation project in China. *Energies*, 12(6), 1015.

[14] Liu, Y., Wang, Y., Li, D., Feng, F., Yu, Q., & Xue, S. (2019). Identification of the potential for carbon dioxide emissions reduction from highway maintenance projects using life cycle assessment: A case in China. *Journal of Cleaner Production*, 219, 743-752.

[15] Choi, J. H. (2019). Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement. *Journal of cleaner production*, 209, 88-100.