

EXPERIENCIAS DE LOS PAVIMENTOS DE LARGA DURACIÓN, COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE EN EL CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

Carlos Adolfo Coria Gutiérrez¹, Rosita Martínez Arroyo²,
Eymard Ávila Vázquez³

¹ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, carlos.coria@ergon.com

² Ergon Asfaltos México, Puebla, México, rosita.martinez@ergon.com

³ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, eavila@ergon.com

Resumen

En los últimos diez años, se ha construido en México el sistema de pavimentación denominado pavimento de larga duración (PLD). Un PLD es un pavimento flexible que se construye para tener una duración mayor a la de un pavimento asfáltico convencional y que es diseñado para más de veinte y cinco años. Este tipo de estructuras se han construido para resistir altos volúmenes de tránsito vehicular. El PLD está conformado por capas estructurales que dotan al sistema de varias características principales. La capa de alto módulo (CAM) es una capa asfáltica densa que permite mitigar el daño por rodera plástica. La capa absorbente de tensión (CAT) es una capa asfáltica rica en asfalto que subyace a la CAM y cuya función es la de resistir las cargas repetitivas que originan el agrietamiento por fatiga en el pavimento. En la parte superior del pavimento se construye una capa de rodadura. Una de las principales características de estos pavimentos es que durante su vida operativa solo es sustituida la capa de rodadura en función de su durabilidad. Lo anterior tiene como consecuencia que no se intervengan las capas estructurales y esto conlleva en ahorros de materiales, ahorros energéticos, menores emisiones, menor afectación a los usuarios y el costo de ciclo de vida más efectivo. En este artículo se presenta la experiencia del PLD construido en la Autopista Querétaro-Irapuato donde se hace un comparativo del análisis del ciclo de vida (LCA) y análisis del costo de ciclo de vida (LCCA) contra un esquema de conservación tradicional.

Palabras Clave: Pavimento de larga duración (PLD), conservación, LCA, LCCA

1 Introducción

En 1994 entró en vigor el Tratado de Libre Comercio (TLC), un acuerdo comercial trilateral firmado por Estados Unidos, Canadá y México. Si bien en estos treinta años se han generado polos de desarrollo económico muy importantes, esto trajo como consecuencia un incremento notorio en los vehículos de carga que transitaban en todos los corredores carreteros del país. Con este tránsito vehicular se empezó a generar un deterioro acelerado y progresivo en los pavimentos con las consecuentes afectaciones para los usuarios. Desde ese momento, dependencias federales de infraestructura carretera y concesionarios privados comenzaron a buscar alternativas y soluciones más duraderas. Entre estas soluciones duraderas se tienen los pavimentos de larga duración (PLD). Los PLD son estructuras que se construyen para tener una vida útil mayor a la de un pavimento convencional. Generalmente se consideran aquellos que tienen una duración mayor a los 25 años. En este pavimento solamente se sustituye periódicamente la capa de rodadura (Stone Matrix Asphalt - SMA, Capa Asfáltica Superficial Altamente Adherida- CASAA, etc) y el resto de las capas estructurales nos son intervenidas.

Los PLD están conformados por dos capas asfálticas que tienen funciones muy particulares y que están diferenciadas de otros sistemas de pavimentación. La capa de alto módulo (CAM) es una mezcla asfáltica densa con tamaño nominal (TN) del agregado de ¾” a finos. Esta mezcla tiene la función de trabajar a rodadura o deformación plástica y para ello presenta un valor de módulo dinámico $|E^*|$ mínimo de 10,000 MPa (10 Hz y 20°C). Subyaciendo a la CAM se tiene una capa absorbente de tensión (CAT) que es una mezcla asfáltica densa (con TN similar a la CAM) que tienen la función de permitir que el pavimento trabaje a la fatiga ocasionada por la acción de las cargas vehiculares y para ello presenta un valor de $|E^*|$ mínimo de 4,000 MPa (10 Hz y 20°C). Debajo de la CAM y CAT se desplantan capas granulares como sub-bases y/o bases hidráulicas. Ver Figura 1.



Figura 1. Pavimentos de Larga duración (PLD). Elaboración propia.

Los PLD se diseñan empleando metodologías empírico-mecanicistas y comúnmente se emplea el software PerRoad 4.4 desarrollado por la National Center Asphalt Technology (NCAT) de Auburn, Alabama [1].

Debido a que en los PLD solamente se sustituye la capa de rodadura, se tienen ventajas desde el punto de vista de la afectación a los usuarios y el ahorro de materiales con la consecuente reducción de emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera. El análisis de costo de ciclo de vida (Life Cycle Cost Analysis LCCA) es una técnica de evaluación aplicable a toma de decisiones en proyectos carreteros. Esta técnica permite determinar la forma más económica de realizar un proyecto. El enfoque de LCCA permite la comparación entre costos totales de distintas alternativas de solución a una situación dada. Entre estos costos totales se encuentran los costos iniciales de construcción y las actividades de conservación y mantenimiento por parte de la agencia o concesionaria. Además, permite estimar los efectos de estas actividades a los usuarios de la infraestructura carretera [2] [3] [4].

El concepto medioambiental del análisis del ciclo de vida (LCA) se introdujo por primera vez en la década de 1960 para controlar y estimar los impactos debidos a los residuos sólidos, así como las emisiones a la atmósfera, la tierra y el agua [5]. Posteriormente se amplió para incluir las emisiones de productos químicos, la producción de energía y el uso de recursos. La primera norma internacional se introdujo en 2004, cuando la ISO 14001 (Organización Internacional de Normalización) proporcionó un marco para estimar estos impactos con el fin de tomar decisiones importantes sobre productos y servicios. Hoy en día existe cuatro normativas relacionadas al análisis de ciclo de vida: a) ISO 14040 establece el marco de referencia, principios y necesidades básicas para realizar el

análisis de ciclo de vida, b) ISO 14041 especifica las necesidades y procedimientos para elaborar la definición de objetivos y alcance del estudio, c) ISO 14042 en la cual se describe y establece una guía de la estructura general de la fase de análisis de impacto y d) ISO 14043 la cual proporciona recomendaciones para realizar la fase de interpretación de un LCA.

En este artículo técnico se presentan el análisis LCA y LCCA en la autopista de cuota Querétaro-Irapuato, tramo del km 7+200 al km 40+000 en cuerpo A del concesionario BANOBRAS. Este tramo vial se encuentra desarrollado en el corredor carretero Querétaro-Ciudad Juárez, uno de los de mayor importancia y relevancia en nuestro país por su ubicación geográfica y estratégica centro-norte.

2. Objetivo

El presente documento tiene como objetivo evaluar los beneficios ambientales y económicos de la selección de pavimentos de larga duración diseñados para alcanzar vidas útiles mayores a los treinta y cinco años en comparación con la selección de una estructura de pavimento en la que se requieran múltiples intervenciones de rehabilitación.

Utilizando un caso de estudio se pretende identificar las oportunidades para mejorar el impacto ambiental y ahorro económico que se tienen implementando tecnologías que contemplan un horizonte de diseño de larga duración.

3. Metodología

En el presente artículo se realiza el análisis de LCA y LCCA de un pavimento convencional y un PLD considerando un período de vida útil de 35 años.

Para el análisis LCA se utiliza la herramienta basada en Excel® LCA Pave desarrollada por la Federal Highway Administration (FHWA). El análisis contempla las siguientes fases (ver Figura 2):

- a) Adquisición y producción de material y procesamiento. Incluye al material asfáltico, los materiales pétreos y la producción de las mezclas en planta.
- b) Construcción. Incluye las actividades de fresado, barrido, aplicación de riegos de liga, colocación de la mezcla y compactación
- c) Mantenimiento y Rehabilitación. En esta etapa se consideran en el PLD los procesos de fresado y reemplazo de capas de rodadura mientras que en la estructura convencional además da la sustitución de la capa de rodadura se considera fresados y colocación de carpetas nuevas.
- d) En fase de vida final se considera que todos los materiales que constituyen la estructura del pavimento convencional y el PLD se pueden reciclar.

Los datos utilizados corresponden a los insumos y actividades de construcción/mantenimiento y rehabilitación utilizados en la carretera Querétaro-Irapuato y suministrados por la compañía constructora.

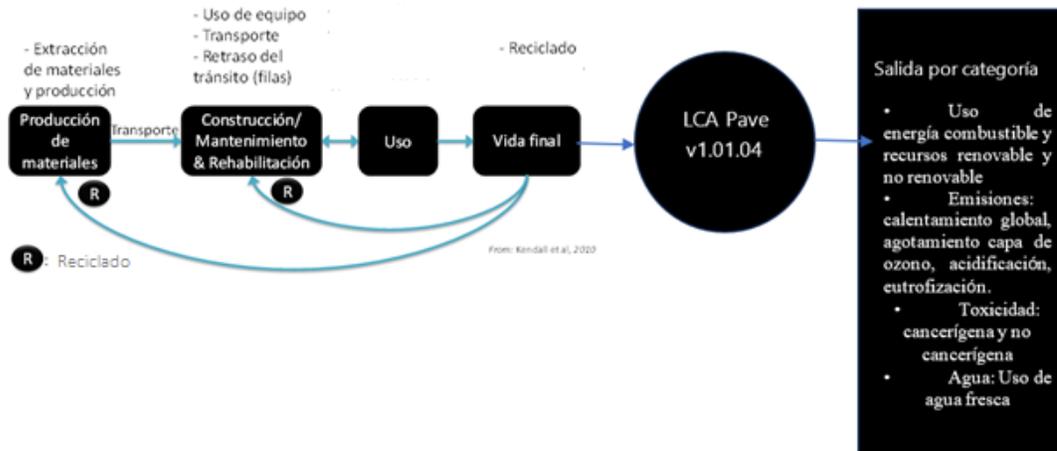


Figura 2. Diagrama de flujo considerado para el análisis de LCA [6].

Para el análisis LCCA se utiliza la herramienta Life Cycle Cost Analysis (LCCA) desarrollado por la Asphalt Pavement Alliance [7]. El software LCCA permite calcular el Valor Presente Neto (VPN) de diferentes alternativas de proyecto, usando un análisis determinístico o probabilístico. Además de que cumple con las recomendaciones de la FHWA para el Análisis del Costo del Ciclo de Vida en el Diseño de Pavimentos. El software LCCA se centra en la determinación de los costos del usuario por las actividades de Construcción, Mantenimiento, Rehabilitación y/o Reconstrucción. En la determinación del VPN se incluyen los costos de la Dependencia y los costos del usuario en la zona de trabajo. Los costos de la dependencia son los relativos a la construcción, mantenimiento y al valor de rescate. Los costos a los usuarios son los relativos a la reducción de la velocidad en las zonas de trabajo (velocidad menor a la de operación), mayores tiempos de espera (mayor tiempo de traslado, creación de filas en horas pico), costos de horas-hombre y sobre costo del viaje. En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a este análisis.



Figura 3. Diagrama de flujo considerado por LCCA (APA).

2.1. Comparativa de estructuras en el análisis LCA y LCCA

Para la comparativa de estructuras de pavimento en el tramo carretero considerado, se empleará un PLD y un pavimento convencional. Para la primera y segunda alternativa se considera el siguiente tren de rehabilitación sobre el pavimento con base cementada mostrada en la Tabla 1 y Figura 4.

Tabla 1. Tren de rehabilitación de la Alternativa 1 y 2 sobre el pavimento con base cementada.

Alternativa 1. PLD	Alternativa 2. Estructura convencional
Recorte y acarreo a banco de tiro de 10 cm de carpeta asfáltica existente.	Recorte y acarreo a banco de tiro de 10 cm de carpeta asfáltica existente.
Recorte y disgregado de 35 cm de base cementada (80% para base hidráulica y 20% de desperdicio).	Recorte y acarreo a banco de tiro de 10 cm de carpeta asfáltica existente.
Colocación de base hidráulica de 28 cm de espesor	Recorte y disgregado de 35 cm de base cementada (80% para base hidráulica y 20% de desperdicio).
Colocación de capa absorbente de tensión (CAT) de 7 cm de espesor	Colocación de base hidráulica de 28 cm de espesor.
Colocación de capa de alto módulo (CAM) de 15 cm de espesor.	Colocación de base estabilizada con asfalto espumado (BEAE) de 30 cm de espesor
Colocación de capa de rodadura tipo CASAA de 3 cm de espesor.	Colocación de carpeta asfáltica densa de 14 cm de espesor.

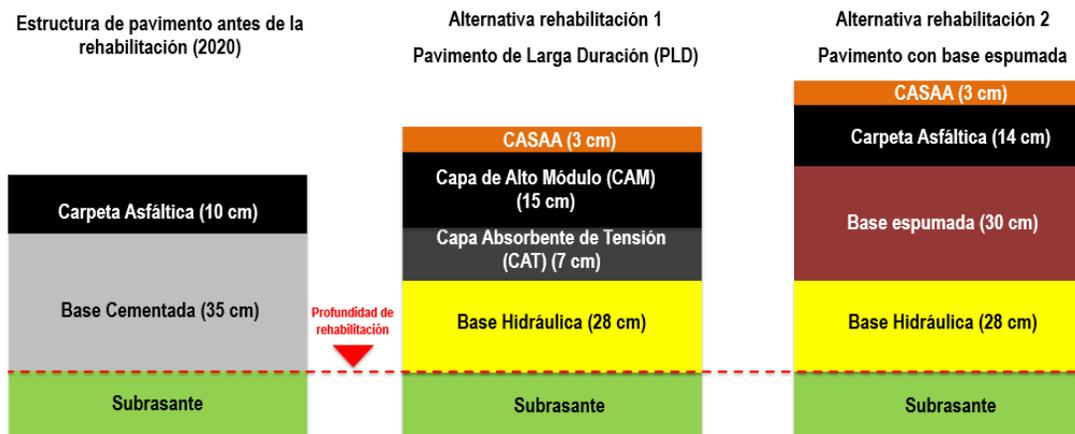


Figura 4. Estructuras de rehabilitación del pavimento para las comparativas de LCA y LCCA.

4. Caso de estudio Autopista Querétaro-Irapuato (BANOBRAS)

Se definió como caso de estudio la autopista Querétaro-Irapuato en el tramo del km 7+200 al 40+000 en cuerpo A. Es una carretera de altas especificaciones conformada por 4 carriles de circulación (2 por sentido en cada cuerpo). Esta vía de comunicación forma parte del corredor carretero Querétaro-

Ciudad Juárez. Esta carretera se desarrolla en el corredor industrial del Bajío que enlaza los estados de Querétaro-Guanajuato. A continuación, se comentan los insumos incorporados a las plataformas de análisis del LCA y LCCA para este artículo técnico.

4.1. Información para análisis LCA

La Tabla 2 y Tabla 3 se presentan el desglose de materiales, equipos de producción, transporte, y equipos de construcción que se consideraron para las intervenciones de fresado, elaboración de mezclas en caliente, tendido, compactación de capas de rodadura y capas estructurales para la alternativa 1 que considera el PLD y la alternativa 2 que considera la construcción de un pavimento convencional.

Tabla 2. Información de materiales y consumos de maquinaria para alternativa 1.

Alternativa 1 (PLD)	Actividad	Capa	Materiales/Consumo maquinaria (horas)
Año 0	Rehabilitación inicial con PLD	RAP	50,516 ton-cortas 560 horas (fresadora)
		Base Hidráulica	153,069 ton-cortas 600 horas (extendidora + equipos de compactación)
		CAT	55,275 ton-cortas 1050 horas (barredora + petrolizadora + producción + extendidora + equipos de compactación)
		CAM	113,511 ton-cortas 1500 horas (petrolizadora + producción + extendidora + equipos de compactación)
		CASAA	22,702 ton-cortas 800 horas (petrolizadora + producción + extendidora + equipos de compactación)
Año 7	Fresado 3 cm + CASAA 3 cm	RAP	15,185 ton-cortas 300 horas (fresadora)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendidora + equipos de compactación)
Año 14	Fresado 3 cm + CASAA 3 cm	RAP	15,185 ton-cortas 300 horas (fresadora)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendidora + equipos de compactación)
Año 21	Fresado 3 cm + CASAA 3 cm	RAP	15,185 ton-cortas 300 horas (fresadora)
		CASAA	22,702 ton-cortas

			1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
Año 28	Fresado 3 cm + CASAA 3 cm	RAP	15,185 ton-cortas 300 horas (fresadora)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)

Tabla 3. Información de materiales y consumos de maquinaria para alternativa 2.

Alternativa 2 (Estructura convencional)	Actividad	Capa	Materiales/Consumo maquinaria (horas)
Año 0	Rehabilitación con pavimento convencional	RAP	50,516 ton-cortas 560 horas (fresadora)
		Base Hidráulica	153,069 ton-cortas 600 horas (extendedora + equipos de compactación)
		Base espumada	1973 ton-cortas 600 horas (barredora + petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
		Carpeta densa	78,964 ton-cortas 1000 horas (petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
Año 7	Fresado 3 cm + CASAA 3 cm	RAP	15,185 ton-cortas 300 horas (fresadora)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
Año 16	Fresado 10 cm + Carpeta densa + CASAA 3 cm	RAP	50,618 ton-cortas 200 horas (fresadora)
		Carpeta densa	78,964 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
		CASAA	22,702 ton-cortas

			1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
Año 21	Fresado 10 cm + Carpeta densa + CASAA 3 cm	RAP	50,618 ton-cortas 200 horas (fresadora)
		Carpeta densa	78,964 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
Año 26	Fresado 10 cm + Carpeta densa + CASAA 3 cm	RAP	50,618 ton-cortas 200 horas (fresadora)
		Carpeta densa	78,964 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
Año 31	Fresado 10 cm + Carpeta densa + CASAA 3 cm	RAP	50,618 ton-cortas 200 horas (fresadora)
		Carpeta densa	78,964 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)
		CASAA	22,702 ton-cortas 1000 horas (barredora+ petrolizadora + producción + extendedora + equipos de compactación)

4.2. Información para análisis LCCA

Para este rubro se estimaron los costos de agencia en los cuales se determinan los volúmenes de obra y los costos directos de cada una de las alternativas planteadas. Se manejan para este caso costos directos de referencia actualizados. En la Tabla 4 se muestran los datos de entrada del tránsito, información que sirve para el cálculo de los costos a los usuarios, así como los costos inherentes a la zona de trabajo, por las reducciones de carriles durante las obras, tanto en la etapa de construcción o rehabilitación inicial, como durante los trabajos de mantenimiento en el horizonte de análisis, el cual se estableció en 35 años. Los costos a los usuarios están asociados a los costos de operación vehicular

Tabla 4. Insumos de tránsito para análisis de LCCA (costos usuarios) [8].

Dato	Valor
------	-------

TDPA diseño	14,070 vehículos
Tasa de crecimiento	3.72 %
Período de análisis	35 años
Vehículos ligeros	75.6 %
Vehículos pesados	24.4 %
ESALS para 35 años	512.1 millones
Tasa de descuento	10%
Vida Útil Remanente/Valor Residual	0

5. Evaluación estructural del PLD

En la Figura 5 se muestran los resultados de la deflexión máxima normalizada a 700 kPa para el tramo en estudio. Las deflexiones obtenidas en 2015 antes de la rehabilitación del pavimento mostraban una condición estructural no aceptable donde se tenían valores de deflexión por arriba de los valores máximos de aceptación de la normativa de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (0.4 mm). Posterior a la rehabilitación del pavimento con PLD, se llevaron a cabo mediciones de deflectometría cuyos resultados en 2022 reflejan una mejoría estructural en el pavimento. El valor promedio de las deflexiones fue de 0.2126 con una desviación estándar de 0.0655. Los valores de deflexiones fueron utilizados para obtener mediante retro calculo los módulos elásticos de las diferentes capas. Utilizando los módulos elásticos obtenidos por retrocálculo se utilizó el software IMT Pave 3.2 para estimar de forma teórica si la estructura cumplirá con la vida útil de diseño mayor a 25 años. De acuerdo con los resultados obtenidos la estructura de PLD tendría una vida remanente superior a los 25 años.

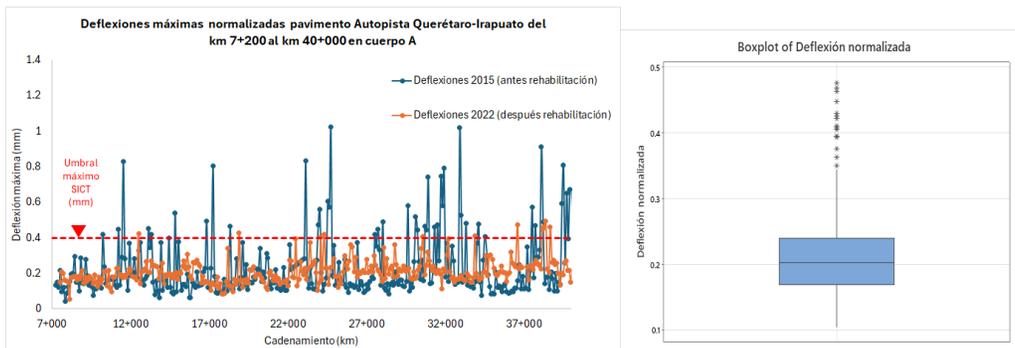


Figura 5. Resultados deflexión máxima Autopista Querétaro-Irapuato del km 7+200 al km 40+000 en cuerpo A (antes y después rehabilitación del pavimento con PLD).

6. Análisis de Resultados

a. Resultados LCA

En la Figura 6 se muestran los resultados globales de las dos alternativas analizadas en este artículo técnico. Para este análisis, puede observarse que la alternativa del PLD (alternativa 1) presenta valores normalizados menores de emisiones contaminantes comparados con la alternativa de pavimento convencional. De forma general hay una reducción del 40% en la mayoría de los indicadores de

impacto del PLD respecto a la alternativa del pavimento convencional. Esto se origina por una mayor cantidad de actividades de intervenciones de conservación en el periodo de vida útil del pavimento convencional. Como se puede apreciar, en el PLD se tiene la mayor afectación en la construcción inicial (ver Figura 7). En cambio, para el pavimento convencional se tiene la mayor afectación en las etapas de conservación a lo largo de la vida útil del proyecto (ver Figura 8).

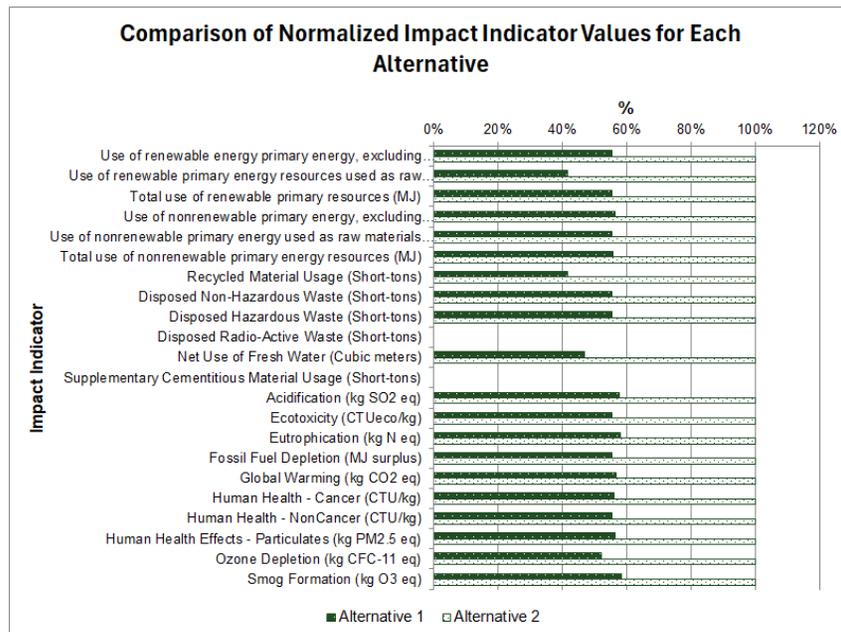


Figura 6. Resultados de LCA. Comparativa de alternativas.

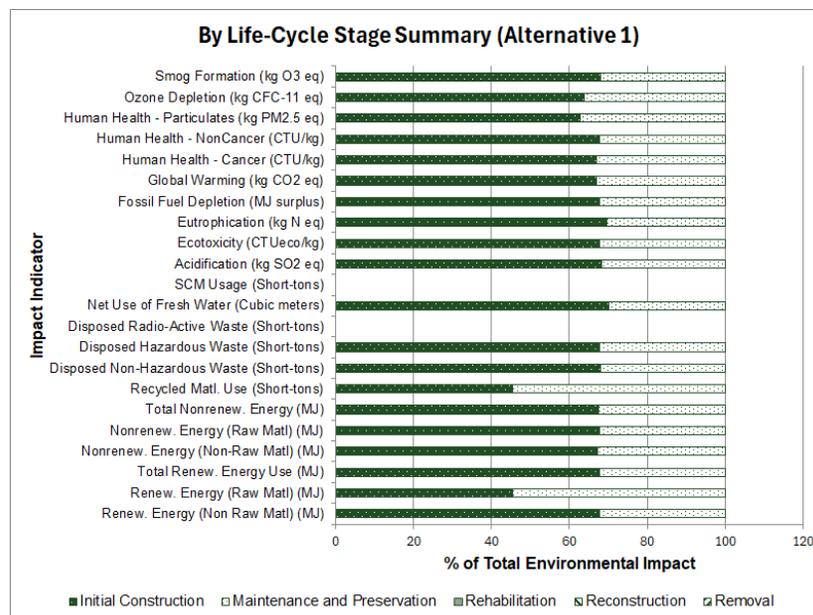


Figura 7. Resultados de LCA. Alternativa 1.

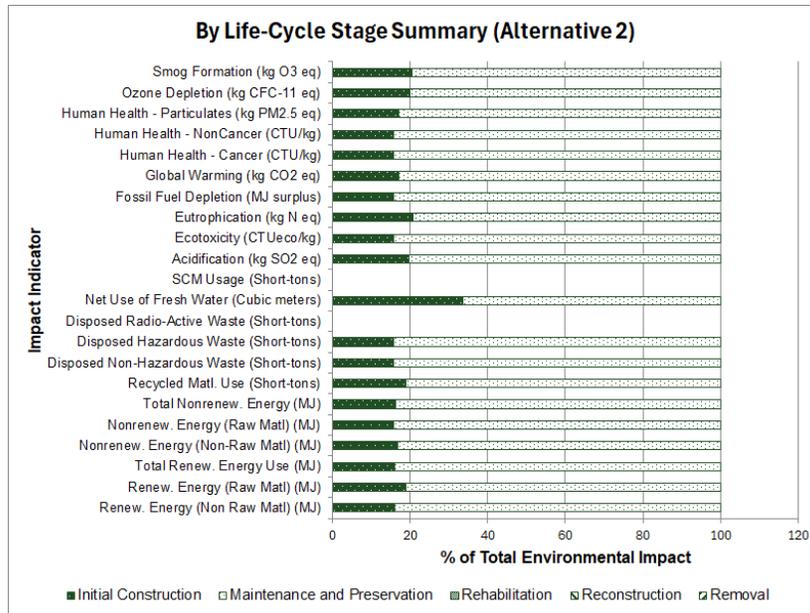


Figura 8. Resultados de LCA. Alternativa 2.

b. Resultados LCCA

La Figura 9 muestra la comparativa de alternativas considerando los costos de la agencia, los costos a los usuarios y los costos totales. La alternativa que presenta los mayores costos para la dependencia y para los usuarios es la alternativa de pavimento convencional (barra verde). Caso contrario, la que representa el menor monto para la dependencia y para los usuarios es la alternativa del PLD (barra azul). Para este caso la alternativa del PLD representa los menores costos obtenidos en el análisis LCCA. Se puntualiza la gran afectación que tiene para el usuario una intervención mayor durante el ciclo de vida del proyecto.

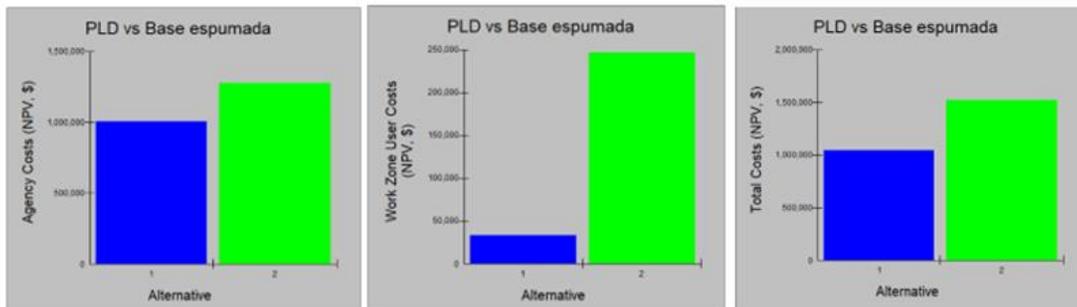


Figura 9. Resultados de LCCA.

7. Conclusiones

- Para el análisis LCA, puede observarse que la alternativa del PLD presenta valores normalizados menores de emisiones contaminantes comparados con la alternativa de

pavimento convencional. Esto se origina por una mayor cantidad de actividades de intervenciones de conservación en el periodo de vida útil del pavimento.

- El análisis LCCA de los dos esquemas de conservación analizados, la alternativa económica más rentable resulta ser el PLD. En este caso es más rentable económicamente un PLD, es decir, una inversión inicial con un mayor costo, para tener las menores afectaciones futuras al tránsito del usuario y menor inversión en el ciclo de vida.
- Para demostrar la capacidad estructural del PLD, se llevaron a cabo mediciones de deflectometría cuyos resultados en 2022 reflejan una mejoría estructural en el pavimento. El valor promedio de las deflexiones fue de 0.2126 con una desviación estándar de 0.0655. Los valores de deflexiones fueron utilizados para obtener mediante retrocálculo los módulos elásticos de las diferentes capas. Utilizando los módulos elásticos obtenidos por retrocálculo se utilizó el software IMT Pave 3.2 para estimar de forma teórica si la estructura cumplirá con la vida útil de diseño mayor a 25 años. De acuerdo con los resultados obtenidos la estructura de PLD tendría una vida remanente superior a los 25 años
- Los análisis LCA y LCCA deben de considerarse como herramientas en la toma de decisiones de alternativas de pavimentación de la red carretera nacional. Los recursos económicos finitos y los aspectos medioambientales hacen que estas herramientas sean necesarias al definir un proyecto de infraestructura.

8. Agradecimientos

Se quiere agradecer a la empresa COCONAL por proporcionar la información de maquinaria, rendimientos y consumo de los trabajos de rehabilitación realizados en esta vía de comunicación.

9. Referencias

- [1] Newcomb, D. E., Timm, D. H. & Willis, J. R. (2020). Perpetual Pavements: A Manual of Practice. 1st Edition. USA. National Asphalt Pavement Association.
- [2] FHWA, (1998), Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design, Publ. N° FHWA-SA-98-079.
- [3] ACPA, (2012), Life-Cycle Cost Analysis. A Tool for Better Pavement Investment and Engineering Decisions.
- [4] US. Department of Transportation, Office of Asset Management. (2002). Life-Cycle Cost Analysis Primer. USA. Federal Highway Administration.
- [5] Harvey, J. T., Meijer, J., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Sabori, A. and Kendall, A. 2016. Pavement Life Cycle Assessment Framework. FHWA-HIF-16-014
- [6] Kendall, A. 2012. Life Cycle Assessment for Pavement: Introduction. Presentation in Minutes, FHWA Sustainable Pavement Technical Working Group Meeting, April 25-26, 2012, Davis, CA.
- [7] Timm, D. H. Life Cycle Cost Analysis of Pavement Structures Software, Auburn University, <https://www.eng.auburn.edu/users/timmdav/Software.html>
- [8] Moreno, F. (2021). Análisis de Costo de Ciclo de vida de pavimentos en autopistas de cuota, XI Congreso Mexicano del Asfalto, Cancún, Quintana Roo.