



## DISEÑO ESTRUCTURAL Y DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTO DESEMPEÑO PARA PAVIMENTOS DE LARGA DURACIÓN

*Francisco Javier Moreno Fierros*  
*Caminos y Puentes Federales (CAPUFE)*  
[fmoreno@capufe.gob.mx](mailto:fmoreno@capufe.gob.mx)

### Resumen

Derivado de la intensidad del tránsito vehicular y de las cargas que circulan por la red de autopistas a cargo de Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), en el pasado las estrategias de conservación de manera tradicional consistieron en trabajos periódicos de fresado y colocación de carpetas asfálticas hasta principios de los años 2000. Posteriormente, y con la incorporación de la red al entonces Fideicomiso de Apoyo al Rescate de Autopistas Concesionadas (FARAC), se modificaron sustancialmente dichas estrategias hacia la recuperación en frío con bases estabilizadas con cemento Portland y carpetas asfálticas. Para responder a dichas exigencias, así como para proporcionar mayor durabilidad a la vida de los pavimentos asfálticos, en la presente década se ha incursionado en la tecnología de estructuras denominadas Pavimento de Larga Duración (PLD) con un desempeño y vida útil superior al de un pavimento convencional (usualmente mayor de 25 años).

El PLD se diseña por medio de metodologías de diseño empírico-mecanicistas a través del uso de los principios de la mecánica correlacionando respuestas críticas en el pavimento con desempeños integrales de la estructura. Existen diversas plataformas de diseño, una de las cuales es la denominada PerRoad 4.3. En esta se consideran distintos insumos de diseño como son, los espectros de carga para el tránsito, así como los modelos de deterioro obtenidos de librerías de materiales.

Se analiza además, el impacto económico y ambiental en el ciclo de vida útil del pavimento considerando la alternativa de PLD y la alternativa de pavimento rígido (PCC).

**Palabras clave:** PLD, fatiga, deformación permanente, espectros de carga, PerRoad, LCCA, LCA.

### 1. Introducción

En respuesta a las necesidades para transportar mercancías y productos así como la movilidad de la población en general, se ha motivado una mayor demanda de la infraestructura carretera. En un marco donde es necesario preservar la infraestructura, así como administrar los recursos financieros destinados a este



motor de la economía nacional, es importante diferenciar y establecer un enfoque holístico de análisis económico y ambiental del ciclo de vida útil de un pavimento evaluando las tecnologías que permitan satisfacer las crecientes demandas.

Para ello, CAPUFE ha venido utilizando una tecnología de estructura de pavimento flexible denominada Pavimento de Larga Duración (PLD). El diseño de este tipo de estructuras se lleva a cabo con plataformas de diseño, una de las cuales denominada PerRoad 4.3 la cual considera distintos insumos iniciales, como la geometría del pavimento, los espectros de carga para el tránsito, los modelos de deterioro obtenidos de librerías de materiales, la variabilidad de espesores y los umbrales de deformación máxima permitidos para controlar la fatiga y la deformación permanente. Todos estos elementos se combinan mediante un análisis aleatorio de Monte Carlo para verificar si la estructura es adecuada para las condiciones consideradas de manera inicial.

De forma general se tratan aspectos de la metodología de mezclas asfálticas de alto desempeño con la que se diseñan y controlan los PLD. Las pruebas que se realizan corresponden, entre otras, a la obtención de los módulos dinámicos de las mezclas para obtener sus rigideces, así como la obtención de la fatiga para estudiar su comportamiento a carga cíclica.

Asimismo es necesario evaluar en los modelos de decisión de inversión y gestión de un pavimento las implicaciones económicas y ambientales de la estructura de pavimento, para lo cual se realiza el análisis económico del costo del ciclo de vida del pavimento (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) y el análisis ambiental en la evaluación del ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA). Ambos, LCCA y LCA constituyen análisis útiles en los modelos de decisión para lograr la preservación de un pavimento buscando disminuir los recursos financieros, materiales e impacto a los usuarios y al medio ambiente.

## **2. Concepto de Pavimento de Larga Duración (PLD)**

Un PLD se define como un pavimento asfáltico diseñado y construido para durar más tiempo que un pavimento convencional, sin necesidad de rehabilitación o reconstrucción estructural importante y sólo necesita la renovación periódica de la capa de rodadura, en respuesta a los deterioros limitados en la parte superior del pavimento.

Los PLD se integran por las siguientes capas: a) capa de desplante o transición, b) capa absorbente de tensión (CAT), c) capa de alto módulo (CAM) y d) capa de rodadura (Figura 1).

- a) Capas de desplante o de transición. Este tipo de capas suelen ser bases que descansan directamente sobre la capa subrasante. Son capas estabilizadas o no. Estas capas deben de tener una resistencia tal que sean capaces de soportar y disipar los esfuerzos que llegan a la profundidad donde se encuentran desplantados.

- b) Capa absorbente de tensión (CAT). Colocada sobre la capa de desplante o de transición. Su función es la de mitigar el agrietamiento por fatiga. Se considera que este deterioro inicia de abajo hacia arriba y se presenta en esta capa.
- c) Capa de alto módulo (CAM). Esta capa es colocada entre la CAT y la capa de rodadura. Tiene que cumplir dos funciones especiales: estabilidad y durabilidad. Estas dos características son esenciales ya que esta capa estará sometida a esfuerzos importantes generados por las cargas del tránsito, por lo que tiene que prevenir la deformación por roderas producidas a través de los esfuerzos de corte.

Capa de desgaste o de rodadura. Es una capa superficial no estructural que tiene la finalidad de proteger al pavimento de los agentes climáticos, principalmente de la introducción de agua superficial y envejecimiento, así como proporcionar una superficie friccionante, bajo nivel de ruido y funcional al usuario del camino.



Figura 1. Pavimento de Larga Duración (Adaptado Newcomb, 2000).

### 3. Diseño del PLD con software PerRoad 4.3

Un PLD se diseña siguiendo una metodología empírico mecanicista. En esta se obtienen respuestas mecánicas del pavimento que se asocian a distintos modos de falla. La deformación a tensión ( $\epsilon_t$ ) debajo de la capa asfáltica esta asociada a la fatiga o agrietamiento tipo piel de cocodrilo, y la deformación a compresión ( $\epsilon_z$ ) arriba de la capa subrasante esta asociada a la deformación permanente (rodera plástica) en las capas de desplante o transición. (Figura 2).

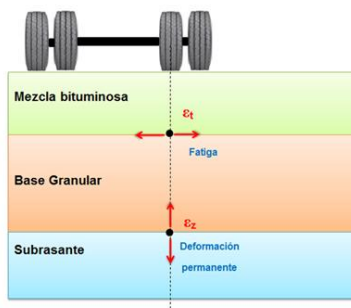


Figura 2. Sistema elástico multicapa para diseño mecanicista de pavimentos flexibles (IMT, 2015)

El programa PerRoad 4.3 (en su versión más actualizada) permite diseñar un PLD tomando en cuenta principios de tipo probabilístico. Este software fue desarrollado por el Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT) de Auburn, Alabama EUA. En él se toman en cuenta estructuras de tipo multicapa con distintas geometrías de espesores y características mecánicas de los materiales que conforman cada capa del pavimento.

### 3.1. Tránsito

Para el tránsito de diseño se toman en cuenta espectros de carga para distintas configuraciones de ejes con rueda sencilla, dual, dual tándem y trídem.

Su caracterización adecuada es uno de los factores críticos para poder concebir estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad, por lo cual es recomendable utilizar estaciones móviles de pesaje dinámico (Weigh in Motion [WIM]) para obtener la información necesaria y obtener los espectros de carga.

Un espectro de carga es la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de este tipo de eje, expresado en porcentaje (Garnica *et al.*, IMT 2013). Los espectros de carga por eje se representan por medio de histogramas de distribución de la carga por eje para cada uno de los cuatro tipos mencionados (Figura 3).

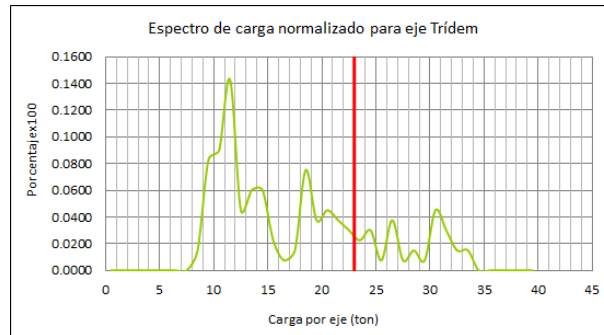


Figura 3. Espectro de carga para eje Tridem (Tramo Cuacnopalan-Oaxaca).

Entre los años 2014-2017 CAPUFE ha llevado a cabo estudios de pesaje dinámico en diferentes tramos de la red a su cargo, obteniéndose los espectros de carga respectivos, los cuales se analizaron utilizando la metodología actualizada del Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2017). En la *Tabla 1* se muestran los porcentajes de sobrecarga respecto a los máximos legales (NOM-012-SCT-2014 pesos y dimensiones máximas para autotransporte de carga) para cada una de las configuraciones.

Como se puede observar en los porcentajes obtenidos de sobrecarga, la consideración de espectros de carga es un factor crítico que tiene que ser modelado en el diseño de espesores del pavimento y que es indispensable para diseñar un PLD. Es decir, de no utilizarse este insumo, podría estarse subdimensionando una estructura de pavimento.

*Tabla 1. Sobrecarga respecto a la NOM-012-SCT-2-2014 (Fuente: CAPUFE).*

Tramo/Eje	Sencillo (%)	Dual (%)	Tándem (%)	Tridem (%)
Estación Don-Nogales	2.2	38.14	8.28	34.83
Gómez Palacio-Corralitos	0.70	6.95	8.81	43.19
Cuacnopalan-Oaxaca	2.07	4.52	9.43	23.31
Puente de Ixtla-Iguala	1.23	3.92	2.15	4.05
Las Choapas-Ocozocoautla	10.16	22.87	19.99	60.29
México-Cuernavaca	2.54	31.29	11.57	28.8

### 3.2. Criterios de falla.

Para los materiales se definen los umbrales de falla tanto por fatiga como por deformación permanente (microdeformaciones) por debajo de los cuales la estructura funcionará de manera correcta ante los esfuerzos de carga transmitidos

por el tránsito vehicular. El programa PerRoad 4.3 permite introducir modelos de deterioro (leyes de comportamiento de los materiales) o umbrales de falla. A continuación se describen ambos conceptos.

a) Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia o modelos de deterioro expresan la cantidad de repeticiones a la falla que son capaces de resistir los materiales bajo la acción de cargas cíclicas del tránsito.

Estas dos respuestas mecánicas pueden observarse en la Figura 2. Mediante la Ley de Miner de daño acumulativo (D) se obtiene la vida remanente del pavimento. El criterio de falla del PLD es cuando el daño acumulado ha llegado al  $D = 0.1$  del daño total, es decir 10 % de la estructura.

b) Umbrales de deformación

Para el análisis de desempeño de los PLD, se establecen umbrales de falla (deformaciones críticas) tanto por fatiga como para deformación permanente. Cuando se excede este umbral de falla, se genera daño en el interior del pavimento. En cambio si el umbral no se excede, no hay daño en la estructura. Estas deformaciones se van a generar a lo largo del tiempo y se derivarán por la variabilidad de las cargas del tránsito, los módulos elásticos del pavimento determinados por temperatura y lluvia, variabilidad de espesores por procedimientos constructivos y funcionalidad del pavimento (deformaciones), etc.

En la Figura 4 (izquierda) se observa la manera en como se analiza el umbral por fatiga. El NCAT de los EUA establece un umbral por fatiga en el PLD de -120 micras. Dado que el PLD utiliza la aleatoriedad del método de Monte Carlo para simular fluctuaciones de carga, espesores y rigideces, PerRoad 4.3 procesa y analiza hasta 5000 secciones diferentes de PLD. El criterio de falla es que al menos el 90% de las respuestas mecánicas por tensión debajo de la capa CAT de todas estas estructuras simuladas aleatoriamente, estén por debajo del umbral de -120 micras, que es la zona donde no existe daño de tipo estructural. En caso de que se tuviera un porcentaje menor al 90% habría que modificar los espesores de las capas asfálticas.

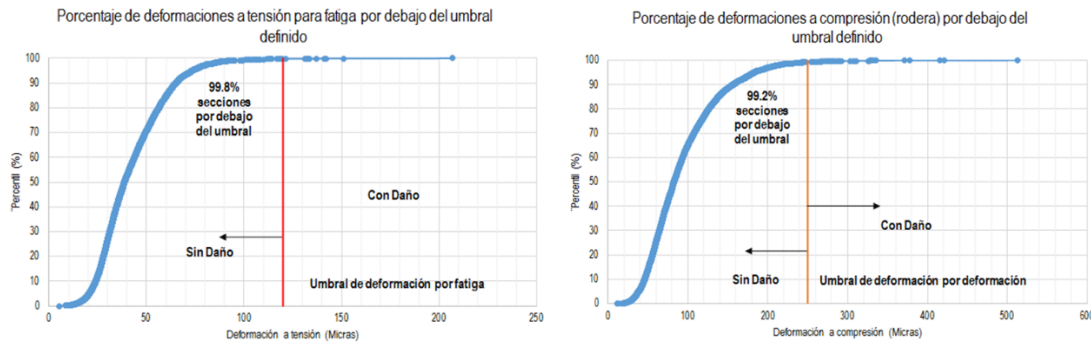


Figura 4 . Umbral de falla por fatiga para PerRoad.

De manera análoga sucede con el criterio por deformación permanente. En la Figura 4 (derecha) se muestran los resultados del umbral por deformación. El NCAT establece un umbral de 250 micras. Nuevamente el criterio de diseño es que al menos el 90% de las respuestas mecánicas por compresión arriba de la capa subrasante de las 5000 estructuras simuladas aleatoriamente, estén por debajo de dicho umbral de falla. Los umbrales de falla por fatiga (-120 micras) y deformación permanente (250 micras) son los recomendados actualmente para su uso en el diseño de PLD.

### 3.3. Estructura y propiedades

Las propiedades fundamentales de los materiales que forman parte de la sección estructural de un PLD, se determinan a partir de ensayos de laboratorio de carga repetida.

Para el caso de las mezclas asfálticas CAM y CAT, se mide el módulo dinámico de la mezcla (AASHTO T-342), que consiste en someter a un espécimen cilíndrico a esfuerzos cíclicos repetidos en condiciones de compresión no confinada. A partir de una extensa biblioteca de materiales considerando asfaltos especialmente diseñados en cada capa, se establecen valores mínimos de módulo dinámico a 20°C, 10 Hz de 5,000 MPa para la capa CAT y de 10,000 MPa para la capa CAM.

Para suelos y materiales granulares, la propiedad de referencia es el módulo de resiliencia (AASHTO T-307). Esta prueba se ejecuta por medio de un ensaye triaxial donde la presión de confinamiento es constante, y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. Los valores típicos utilizados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores típicos del módulo resiliente, Mr (Zárate, 2007)

Capa	Rango de Mr (MPa)	Valor típico (MPa)
Base Hidráulica	150-750	325
Sub-rasante	35-210	120
Terreno de cimentación	12-55	35



Estos valores de módulos dinámicos y resilientes utilizados en el diseño del pavimento y como insumos de PerRoad se vuelven parámetros críticos que deberán ser alcanzados en el diseño de la mezcla asfáltica tanto en laboratorio como en obra para asegurar la durabilidad a la que fue diseñada la estructura del pavimento.

### 3.4. Factores ambientales

En este software de diseño se toman en cuenta las variaciones estacionales del clima que inciden en el comportamiento mecánico de cada una de las capas del pavimento. Esto es, la variación de sus rigideces por efectos de la temperatura y la humedad de cada una de las capas.

## 4. Comparativa con otros programas de diseño

Existen diversas diferencias entre el programa PerRoad 4.3 y los programas de diseño de pavimentos flexibles utilizados de manera tradicional. En la Tabla 3 se muestran los principales insumos de diseño y si se encuentran contenidos o no en cada uno de los programas que se comparan: DISPAV UNAM, AASHTO 93, PerRoad 4.3, entre otros. Por ejemplo, DISPAV y AASHTO 93 son programas de tipo determinista (no toman en cuenta automáticamente la aleatoriedad de carga, espesores y módulos elásticos de los materiales con el tiempo). PerRoad 4.3 sí toma en cuenta este fenómeno. Otra variante es que tanto DISPAV como AASHTO 93 no toman en cuenta los espectros de carga del tránsito. PerRoad 4.3 sí los toma en cuenta, sin embargo, los ejes sencillos equivalentes (ESALS) ya no son considerados. Cabe destacar la posibilidad de introducir al PerRoad 4.3 los modelos de deterioro o leyes de fatiga de los materiales.

Tabla 3. Comparativa de programas de diseño de pavimentos convencionales.

Insumo/programa	DISPAV	AASHTO 93	DAMA (Asphalt Institute)	AASHTO DARWIN 2008	PerRoad 4.3
Simulación automática aleatoria	NO	NO	NO	SI	SI
Espectros de carga	NO	NO	NO	SI	SI
Introducción Modelos de deterioro	NO	NO	NO	NO	SI
Determinista	SI	SI	SI	SI	SI
Probabilista	NO	NO	NO	SI	SI
Clima (estaciones climatológicas)	NO	SI	SI	SI	SI





## 5. Análisis Económico del Costo de Ciclo de Vida (LCCA)

El LCCA es una técnica de análisis que evalúa la eficiencia económica a largo plazo entre diferentes alternativas de inversión, involucrando los costos para las dependencias gubernamentales en el ciclo de vida de un pavimento (construcción, rehabilitación, mantenimiento, valor de rescate, etc), así como costos para los usuarios (tiempos de espera, reducción de velocidad, etc). El LCCA pretende ayudar a indentificar la mejor alternativa (menor costo a largo plazo que satisfaga las necesidades y objetivos de ingeniería) para proyectos de inversión.

Diversos softwares para ayudar a realizar estos análisis de ciclo de vida han sido desarrollados como el programa RealCost de la Federal Highway Administration (FHWA) o el programa LCCA 3.1 desarrollado por la Asphalt Pavement Alliance el cual considera los principios de la FHWA.

En este documento se realiza como ejemplo el LCCA para la autopista México-Cuernavaca, comparando un PCC y un PLD para un período de diseño de 30 años, considerando una tasa de crecimiento anual de 2.66%.

### Datos generales del proyecto

- Periodo de análisis: 30 años
- Tasa Social de Descuento (TSD): 10% (SHCP, 2014)
- TDPA: 42,237 vehículos en ambos sentidos
- % Vehículos Pesados: 10.2%
- Longitud del proyecto: 56.6 km
- No. de carriles: 4, 5 y 6 carriles
- Velocidad límite: 110 km/hr
- Velocidad zona de trabajo: 40 km/hr
- Carriles cerrados a la circulación: 1 en cada sentido
- Alternativas de diseño: PCC y PLD.

Para este período de diseño las estructuras de pavimento determinadas se muestran en la Figura 5.

En el análisis se contemplaron actividades de construcción y mantenimiento (C&M) para cada una de las estructuras (*Tabla 4* y *Tabla 5*) de acuerdo a la experiencia generada en los tramos carreteros a cargo de CAPUFE para ambas alternativas.

Un aspecto importante a considerar es que al final del periodo de vida útil del PCC es necesaria la rehabilitación parcial del mismo, que para el caso del PLD al final de su vida útil, este presenta daño estructural menor al 10%. Lo anterior se traduce en un valor de rescate mayor para el PLD que para la estructura de PCC, lo cual no está considerado en el presente análisis.

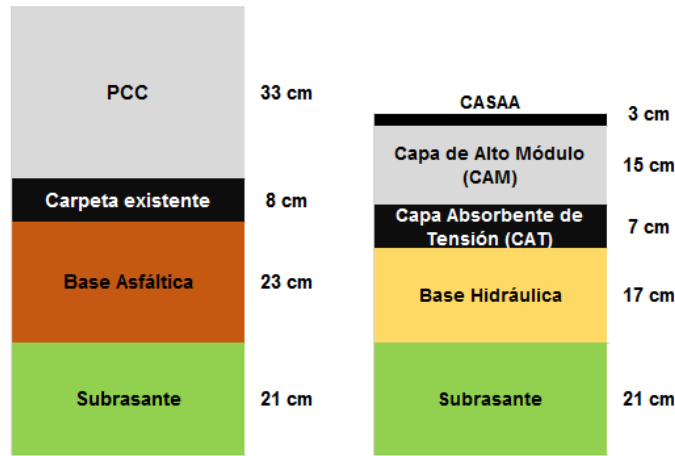


Figura 5. Estructura PCC y estructura PLD.

Tabla 4. Programa C&M, PLD.

PLD	
Actividad C&M	Año
Construcción Inicial	0
Fresado+CASAA_4cm	6
Fresado+CASAA_4cm	12
Fresado+CASAA_4cm	18
Fresado+CASAA_4cm	24
Fresado+CASAA_4cm	30

Tabla 5. Programa C&M, PCC.

PCC	
Actividad C&M	Año
Construcción Inicial	0
Calafateo y Rep. Sellos en Juntas (60%)	5
Grietas y despostillamientos (2%)	5
Demolición/Reposición Losas (1.0%)	5
Calafateo y Rep. Sellos en Juntas (60%)	10
Grietas y despostillamientos (2%)	10
Demolición/Reposición Losas (1.2%)	10
Calafateo y Rep. Sellos en Juntas (60%)	15
Grietas y despostillamientos (2%)	15
Demolición/Reposición Losas (1.4%)	15
Microfresado (Fricción)	20
Calafateo y Rep. Sellos en Juntas (60%)	20
Grietas y despostillamientos (2%)	20
Demolición/Reposición Losas (1.6%)	20
Calafateo y Rep. Sellos en Juntas (60%)	25
Grietas y despostillamientos (2%)	25
Demolición/Reposición Losas (1.8%)	25
Calafateo y Rep. Sellos en Juntas (60%)	30
Grietas y despostillamientos (2%)	30
Demolición/Reposición Losas (2.0%)	30

En lo que concierne a la información de tránsito, para la distribución horaria de vehículos por dirección, se alimentaron los datos de los aforos reales obtenidos de la plaza de cobro de dicha autopista (Figura 6). Por el tipo de orografía del tramo carretero se utilizó el tipo de terreno semi-montañoso y considerando el porcentaje de vehículos pesados se obtuvo el factor de equivalencia que afecta la velocidad de flujo libre.

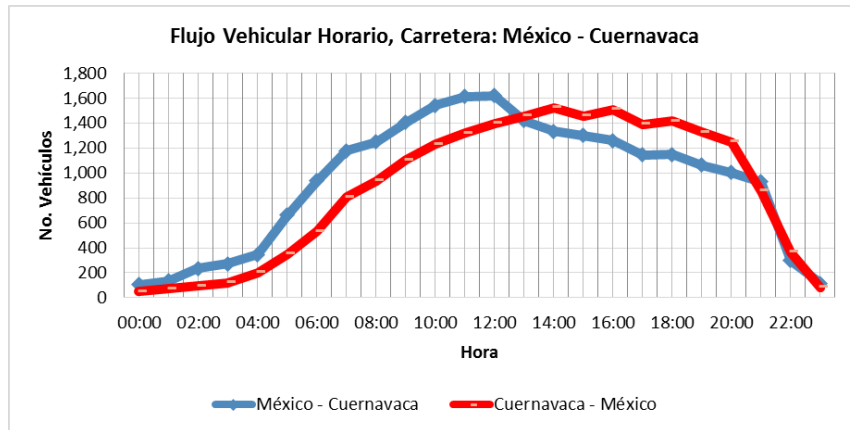


Figura 6. Flujo vehicular horario México-Cuernavaca en ambos sentidos.

Los costos de C&M de cada una de las alternativas fueron obtenidos de la información con la que cuenta CAPUFE. En los costos vehiculares se actualizó el índice de precios al consumidor (CPI) considerando el publicado para México en el 2017 de 126 puntos, con base en la información del INEGI (IECONOMICS INC, 2017).

### Costo para la Dependencia

Son los costos debidos a las actividades de los materiales, mano de obra y control de tráfico implícitos en las etapas de construcción, mantenimiento y/o rehabilitación, demolición o remoción de la estructura del pavimento al final del periodo de diseño. En la Figura 7 se muestran los costos asociados a la dependencia, de los cuales se puede ver que en la etapa inicial de la construcción, la alternativa de PCC es un 25% mayor que la de PLD. En el tiempo de acuerdo al programa C&M de ambas alternativas, la brecha inicial se va cerrando hasta ser un 11% más con PCC que con la alternativa de PLD.

### Costo para los usuarios

Estos costos representan los gastos generados por el paso de los distintos tipos de vehículos por una zona que se encuentra bajo construcción, los cuales se pueden agrupar en: 1) Costos de operación vehicular, en los cuales se cuantifica el combustible adicional y el mantenimiento del vehículo; 2) Retrasos por cambio de velocidad y 3) Retrasos por velocidad reducida (Musselman, 2015). Todos estos costos quedan asociados además a las filas generadas por la capacidad de flujo de la vialidad en estudio, dependiendo de los carriles abiertos a la circulación, el TDPA, la tasa de crecimiento vehicular, así como la distribución horaria del flujo vehicular (horas pico). La Figura 7 contempla los costos adicionales de los usuarios, los cuales son 76% más con PCC que con PLD al año 30 y que en promedio son 42% más con PCC que con la alternativa de PLD durante el periodo de análisis contemplado.



## Costos totales

Los costos totales son la suma de los costos de la dependencia de acuerdo al programa C&M en el tiempo, más los costos de los usuarios en la zona de trabajo (Figura 7).

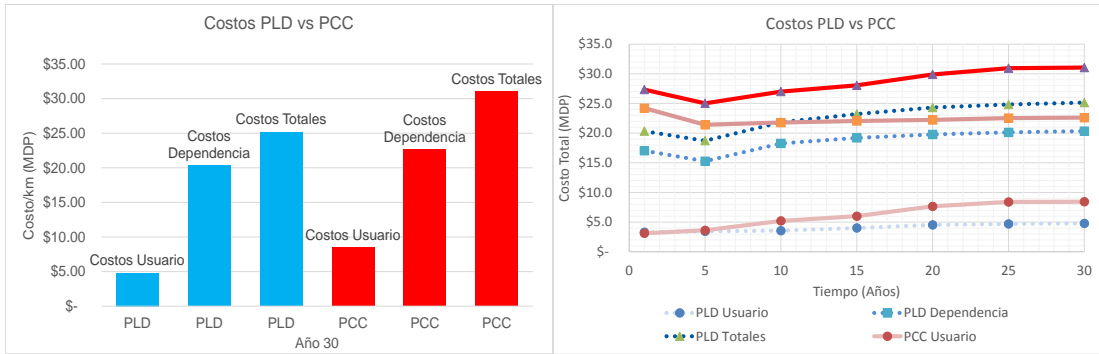


Figura 7. Costos PLD vs PCC en 1km, en el año 30 y en el tiempo (de izquierda a derecha).

Respecto a los costos totales se tiene que la alternativa de PCC es un 24% mayor en promedio a la alternativa de PLD al final del periodo de análisis. Si consideramos la longitud total de la autopista en estudio (56.6 km), se tiene que al final del periodo de análisis (30 años), el ahorro en costos de la dependencia y del usuario son de aproximadamente 128 MDP y 206 MDP respectivamente.

## 6. Evaluación del ciclo de vida. Life-cycle Assessment (LCA)

Es un método que permite evaluar el impacto ambiental a través del ciclo de vida de un sistema o producto, desde la extracción de materiales, manufactura, uso y disposición final (“cradle-to grave”).

El objetivo de estos análisis es promover diseños responsables y rediseños de productos o procesos que reduzcan el impacto ambiental y las emisiones de materiales tóxicos. LCA es diferente al Análisis Económico del Costo del Ciclo de Vida (LCCA) y comúnmente son usados en conjunto para buscar la solución más sustentable involucrando aspectos ambientales y económicos.

En la Figura 8 se muestra el análisis del ciclo de vida de un pavimento y sus implicaciones al medio ambiente. En este análisis se considera crítico modelar las emisiones de gases de efecto invernadero por lo cual en este estudio se realiza dicho análisis utilizando la herramienta PE-2 Project Emission Estimator basado en las investigaciones realizadas en la Universidad Tecnológica de Michigan.

Considerando los programas C&M establecidos en la *Tabla 4* y *Tabla 5* para PLD y para el PCC respectivamente, se realizó el análisis de emisiones por intervención, considerando la cantidad de material requerida por kilómetro. En la *Tabla 6* se

muestra un resumen de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en toneladas métricas que se tienen en cada intervención y el método utilizado para su estimación.

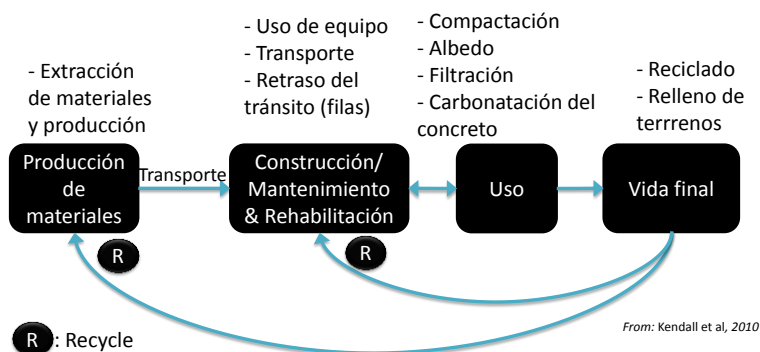


Figura 8. Evaluación del ciclo de vida de un pavimento.

Tabla 6. Estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por actividad.

PLD				PCC			
Actividad	Año	Emisiones (Ton métricas CO <sub>2</sub> )	Método	Actividad	Año	Emisiones (Ton métricas CO <sub>2</sub> )	Método
Construcción inicial				Construcción inicial			
Fresado y construcción de capas CAT, CAM Y CASAA	0	238.67	Factores de emisión/ EIO-LCA	PCC	0	1945.0691	Factores de emisión
Mantenimiento				Mantenimiento			
Fresado + CASAA 4 cm	6	39.38	Factor de emisión y Proyecto	Calafateo reposición de sellos en juntas y grietas y despostillamiento. Demolición y reposición de losas	5	35.99	Factores de emisión
Fresado + CASAA 4 cm	12	39.38			10	42.85	
Fresado + CASAA 4 cm	18	39.38			15	49.68	
Fresado + CASAA 4 cm	24	39.38			20	56.53	
Fresado + CASAA 4 cm	30	39.38			25	63.36	
Total		435.57			30	70.19	
				Total		2.263.68	

En la Figura 9 se muestra que las emisiones en la etapa inicial de construcción del PCC presenta aproximadamente ocho veces más emisiones que el PLD, esto se debe principalmente a las altas emisiones asociadas con producción del cemento; mientras que en la etapa de mantenimiento las emisiones acumuladas para el período de 30 años, el PCC presenta 1.6 veces más emisiones que el PLD.

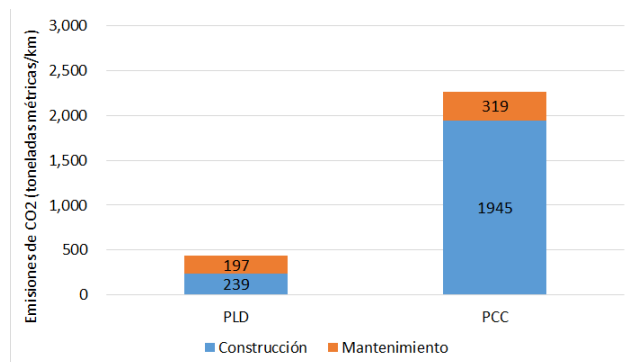


Figura 9. Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente en las etapas de construcción inicial y mantenimiento de las estructuras de PLD y PCC.

## 7. Conclusiones

Los PLD son estructuras con desempeños y periodos de vida mayores a los de pavimentos flexibles convencionales. Son diseñados con esquemas empírico mecanicistas donde se correlacionan respuestas mecánicas en el interior del pavimento con desempeños integrales como la fatiga en los materiales estabilizados y la deformación permanente en los no tratados.

Para este tipo de estructuras, puede utilizarse una plataforma de diseño concebida especialmente para ellas: el programa PerRoad 4.3 desarrollado por el NCAT de EUA. Este programa permite llevar a cabo análisis y diseños de pavimentos más realistas a las condiciones a las que va a estar sujeto el pavimento. Utiliza espectros de carga, umbrales de falla tanto por fatiga y deformación permanente y permite utilizar modelos de deterioro (leyes de fatiga) para los materiales que se van a utilizar durante la construcción.

Un aspecto de suma importancia es el análisis económico del costo de ciclo de vida (LCCA). El LCCA pretende ayudar a identificar la mejor alternativa de menor costo a largo plazo que satisfaga las necesidades y objetivos de ingeniería, para proyectos de inversión. Otro aspecto es el análisis del ciclo de vida (LCA), método que permite evaluar el impacto ambiental a través del ciclo de vida de un sistema o producto, desde la extracción de materiales, manufactura, uso y disposición final. En este documento se realiza el análisis del costo de ciclo de vida de pavimento para el tramo carretero México-Cuernavaca del km 24+000 al km 80+500, para un PCC y una estructura flexible utilizando la tecnología de PLD y un período de diseño de 30 años, considerando una tasa de crecimiento de 2.66%.

Del análisis del costo de ciclo de vida se encontró que para este caso resulta ser más viable la opción de PLD teniendo una reducción de los sobrecostos del usuario y de la dependencia en el periodo de análisis de aproximadamente 206 MDP y 128 MDP respectivamente. Que los costos totales (dependencia + usuario) son en promedio alrededor de 24% mayores con la alternativa de PCC, los cuales son el reflejo del balance entre lo que invierte la dependencia y lo que en términos generales le cuesta al país cada una de las alternativas seleccionadas.



Por medio del análisis de emisiones se encontró que para este caso en el ciclo de vida las emisiones del PCC acumulan 2,263 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente en comparación con 436 toneladas métricas del PLD. Obteniendo una alternativa de menor impacto ambiental.

Por último cabe resaltar un aspecto fundamental para el diseño de pavimentos, tanto PLD como otros tipos de diseño, respecto de la importancia de llevar a cabo estudios de pesaje dinámico, así como la obtención de los espectros de las cargas reales que transitan por la red carretera nacional o bien, los ESALs reales para el diseño.

## 8. Bibliografía

Asphalt Pavement Alliance (APA). 2002. *Perpetual Pavements: A Synthesis. APA 101*, Lanham, Maryland, EUA.

Ferne B., Nunn Mike, 2016, *The European Approach to Long Lasting Asphalt Pavements, A State-of-art review by ELLPAG*, International Conference on Perpetual Pavement Columbus, Ohio.

Garnica, P., Hernández. R, 2013, *Manual del Usuario IMT-PAVE 1.1*, , San Fandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.

IECONOMICS INC, 2017. *TradingEconomics*. [En línea] Available at: <https://tradingeconomics.com/mexico/consumer-price-index-cpi>.

Instituto Mexicano del Transporte, 2017. *Aplicaciones del monitoreo de pavimentos a largo plazo*, Curso de actualización Postprofesional, Querétaro, México.

Musselman, M. A., 2015. *A Review of the Alabama Department of Transportation's Policies and Procedures for Life-Cycle Cost Analysis for Pavement Type Selection*. Auburn(Alabama): Universidad de Auburn.

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) 2014. Oficio Circular No. 400.1.410.14.009. Tasa Social de Descuento (TSD).

Timm D. (2017). "Perpetual Pavements PerRoad 4.3" Webinar, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn Alabama, USA.

NOM-012-SCT-2-2014. "Sobre el peso y dimensiones máximas con las que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.

Zárate M. 2007. "Diseño de Pavimentos Flexibles", Segunda parte, Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC), México, DF.

PE-2 Project Emissions Estimator . [En línea]

Available at: [http://www.construction.mtu.edu/cass\\_reports/webpage/index.html](http://www.construction.mtu.edu/cass_reports/webpage/index.html)