

# SOLUCIONES PARA UNA PAVIMENTACIÓN ECOLÓGICA Y MATERIALES SOSTENIBLES

ESTADO DEL ARTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS, RETOS Y  
TECNOLOGÍAS NUEVAS Y EMERGENTES

COMITÉ TÉCNICO D.2 PAVIMENTOS DE CARRETERAS



# **SOBRE LA ASOCIACIÓN MUNDIAL DE LA CARRETERA**

*La Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR) es una organización sin fines de lucro establecida en 1909 para mejorar la cooperación internacional y fomentar el progreso en el ámbito de las carreteras y el transporte por carretera.*

*El estudio objeto del presente informe se definió en el Plan Estratégico de la AIPCR de 2016-2019 aprobado por el Consejo de la Asociación Mundial de la Carretera, integrado por representantes de los gobiernos nacionales miembros. Los miembros del Comité Técnico responsable de este informe fueron nominados por los gobiernos nacionales miembros debido a sus competencias especiales.*

*Las opiniones, resultados, conclusiones y recomendaciones expresadas en esta publicación son las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de sus entidades o agencias matrices.*

*Este informe está disponible en la página web de la Asociación Mundial de la Carretera: <http://www.piarc.org>*

*Copyright World Road Association. Reservados todos los derechos.*

*Asociación Mundial de la Carretera (PIARC)*

*Arche Sud 5° niveau*

*92055 La Défense Cedex, France*

*ISBN: 978-2-84060-600-0*

*Portada © Comité técnico D.2*

# **SOLUCIONES PARA UNA PAVIMENTACIÓN ECOLÓGICA Y MATERIALES SOSTENIBLES**

**ESTADO DEL ARTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS,  
RETOS Y TECNOLOGÍAS NUEVAS Y EMERGENTES**

**COMITÉ TÉCNICO D.2 *PAVIMENTOS DE CARRETERAS***

## AUTORES / AGRADECIMIENTOS

Este informe fue preparado por el grupo de trabajo D.2.1 del Comité Técnico D.2 Pavimentos Viales de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC).

Los contribuyentes a la preparación de este informe son:

- Gina Ahlstrom (Estados Unidos)
- Joralf Aurstad (Noruega)
- Mario Krmek (Austria)
- Johan Maeck (Bélgica)
- Michael Moffatt (Australia)
- Mirriam Mosia (Sudáfrica)
- Oliver Ripke (Alemania)
- Safat Said (Suecia)
- Mike Southern (Bélgica)
- Militzia Zamurovic (Bélgica)

Los editores de este informe son Gina Ahlstrom (Estados Unidos) con una contribución significativa de Milenia Rangelov (Estados Unidos) para la versión en inglés, Militzia Zamurovic (Bélgica) para la versión francesa, y Jesús Díaz Minguela (España) para la versión española.

El informe fue examinado en el Comité Técnico y externamente por Thomas Van Dam (Consulting Engineers Nichols, Estados Unidos).

El Comité Técnico estuvo presidido por Han Seung-Hwan (Corea del Sur), y Johan Maeck (Bélgica), Serge Krafft (Francia) y Diego Calo (Argentina) fueron los secretarios de habla inglesa, francesa y española, respectivamente.

2019R32ES

## **SOLUCIONES PARA UNA PAVIMENTACIÓN ECOLÓGICA Y MATERIALES SOSTENIBLES**

### **ESTADO DEL ARTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS, RETOS Y TECNOLOGÍAS NUEVAS Y EMERGENTES**

Este informe resume el estado actual de la práctica para las técnicas de pavimentos sostenibles y los incentivos utilizados para fomentar su uso. Se identifican varias soluciones de pavimentación sostenible mostrando algunas barreras existentes para su implementación más amplia. La información contenida en este informe se basa en la revisión de la literatura y en un cuestionario realizado entre 42 representantes de 20 países de todo el mundo.

Las técnicas de pavimento sostenible se pueden incorporar a todos los pavimentos desde la etapa de diseño hasta el final de la vida útil. La reciclabilidad futura es un factor principal para garantizar la implementación de técnicas nuevas e innovadoras. Se han incluido ejemplos de varios países en este informe. También se incluyen recomendaciones para mejorar las soluciones de pavimentación ecológica, los materiales de pavimento sostenibles y las barreras para su implementación.

# CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2. EL RESULTADO DEL CICLO 2012 A 2015.</b> .....	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS DE LA ENCUESTA / CUESTIONARO</b> .....	<b>5</b>
3.1. VISIÓN GENERAL.....	5
3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ENCUESTA. ....	6
<b>4. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>11</b>
4.1. FUNDAMENTOS DE DISEÑO.....	11
4.2. MATERIALES .....	15
4.3. CONSTRUCCIÓN.....	24
4.4. FASE DE USO.....	27
4.5. MANTENIMIENTO.....	31
4.6. FIN DE LA VIDA .....	34
<b>5. ACTIVIDADES DE ESTANDARIZACIÓN</b> .....	<b>39</b>
5.1. ESTADO DEL ARTE .....	39
<b>6. ESTADO ACTUAL EN LA CONTRATACIÓN PÚBLICA ECOLÓGICA (GPP)</b> .....	<b>48</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>50</b>
<b>8. GLOSARIO</b> .....	<b>51</b>
<b>9. REFERENCIAS</b> .....	<b>54</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el ciclo de trabajo anterior de PIARC, se desarrolló un informe sobre la evaluación y reducción de la huella de carbono de los pavimentos. [1]. El informe se centró en un único punto final sobre la sostenibilidad, la huella de carbono, y consideró solo la fase de construcción del ciclo de vida del pavimento. Una conclusión de ese informe era que se deben considerar otros aspectos importantes a la hora de realizar una evaluación de sostenibilidad, además de la fase de construcción inicial y la huella de carbono (en adelante CF).

La evaluación de la sostenibilidad es compleja de realizar. Además de una multitud de indicadores de impacto, la disponibilidad de datos fiables, la selección de unidades funcionales o declaradas apropiadas y, lo que es más importante, la comparación de las soluciones, presentan desafíos importantes para los profesionales. Por otra parte, las carreteras son generalmente propiedad pública y por lo tanto la contratación con criterios de sostenibilidad presenta una adicional complejidad.

El informe en cuestión se basa en la revisión exhaustiva de la literatura actual, así como en el cuestionario realizado como parte de los esfuerzos de PIARC durante el período 2015-2019. Durante ese ciclo de trabajo, los miembros de PIARC recopilaron datos sobre el uso actual de las técnicas sostenibles y los incentivos a través de cuestionarios, incluyendo el resumen de las respuestas. El cuestionario se realizó entre 42 representantes de 20 países, incluidos tres grupos principales de partes interesadas, a saber, autoridades viales, contratistas privados de carreteras y técnicos de investigación. El objetivo principal de la encuesta fue identificar y explorar las soluciones de pavimentación ecológica que actualmente están en uso y las barreras para su implementación más amplia.

El propósito principal de este informe es proporcionar una descripción general de las soluciones actuales de pavimento sostenibles que contribuyen a reducir el impacto ambiental durante las etapas en la construcción, en el uso y al final de la vida útil del ciclo de vida de los pavimentos a nivel mundial. Además, este informe pretende arrojar luz sobre la evaluación de la sostenibilidad, las prácticas de éxito y su implementación, así como identificar los principales obstáculos a la aplicación más amplia de innovaciones sostenibles. Por último, en este informe se consideran los incentivos utilizados a nivel nacional o regional para adoptar e implementar soluciones sostenibles.

## 2. EL RESULTADO DEL CICLO 2012 A 2015.

Los objetivos establecidos por PIARC para el grupo de trabajo en el ciclo 2012-2015 fueron informar sobre las innovaciones que condujeron a la reducción del a CF en los pavimentos [1]. Se reconocía que hay numerosos otros indicadores ambientales para pavimentos de carreteras, pero estos se consideraron fuera del alcance del trabajo de ese ciclo. En consecuencia, los objetivos se establecieron de la siguiente manera:

- Revisión de los comentarios del campo sobre las innovaciones recientes (productos, equipos) que contribuyen a reducir el CF en los pavimentos, en particular, las tecnologías de mezclas asfálticas tibias (de baja temperatura).
- Una revisión crítica de la evaluación de las reducciones de CF introducidas por el uso de materiales reutilizados, reciclados y recuperados en comparación con las prácticas y los materiales de construcción estándar.

Se eligió una metodología mixta basada en un cuestionario, casos de estudio, encuesta bibliográfica y la revisión y evaluación de las innovaciones. Se revisó además algunas **herramientas de CF**. La revisión arrojó los siguientes resultados:

- Están disponibles una amplia variedad de herramientas
- Para hacer un buen uso de cada herramienta es necesario un conocimiento profundo tanto del cálculo como de las hipótesis subyacentes.
- Se deben establecer las fortalezas y debilidades de cada herramienta.
- La identificación de la herramienta adecuada para usar en la situación dada es un desafío.
- Las herramientas presentan diferencias en los datos de origen, las suposiciones y los límites del sistema, lo que lleva a variaciones en la salida de resultados.
- La mayoría de las herramientas cubren la etapa de producción y construcción, pero tienen un enfoque diferente (por ejemplo, en la composición de la mezcla, otras en la fase de construcción).
- Ninguna de las herramientas incorpora fase de uso y tráfico.

Las siguientes conclusiones se pueden extraer del trabajo realizado en el ciclo 2012 a 2015 [1] :

- Los límites del sistema y la metodología de asignación son importantes para cualquier evaluación de la CF y, por lo tanto, deben definirse y entenderse de manera clara. Se deben considerar todas las etapas del ciclo de vida desde la adquisición de la materia prima hasta la construcción del pavimento.
- Se han revisado múltiples innovaciones para reducir la CF. La cuantificación de los efectos de la innovación frente a una línea de base estándar es necesaria para establecer la efectividad. En muchos casos, hay poca evidencia objetiva presentada para demostrar una reducción en la CF.
- Como se dijo anteriormente, la CF es solo un criterio de sostenibilidad. Otros impactos, como el uso de recursos, el consumo de energía u otros impactos ambientales, también son influyentes y, por lo tanto, deben evaluarse adecuadamente.

### 3. RESULTADOS DE LA ENCUESTA / CUESTIONARIO

#### 3.1. VISIÓN GENERAL

Este informe se dirige al Comité de Pavimentos de PIARC “Soluciones de pavimentación ecológica y materiales sostenibles”. Los objetivos del grupo de trabajo establecidos por PIARC fueron “investigar los desafíos e incentivos utilizados en los diferentes países para fomentar el uso de métodos y materiales que minimizan el uso de recursos naturales, reducen el consumo de energía y las emisiones durante la vida útil de los pavimentos, a la vez que mejorar la seguridad.” Se tuvieron en cuenta el reciclaje, las mezclas asfálticas de baja temperatura o tibias, y los nuevos ligantes y áridos. Para identificar las técnicas de pavimentación ecológica (en adelante GPT's) GPT's) utilizada en todo el mundo, los miembros de PIARC realizaron una encuesta durante el ciclo de trabajo 2015-2019. Esta sección resume los resultados de la encuesta.

El enfoque prioritario del cuestionario fue la recopilación de datos de los miembros de PIARC sobre el uso actual de técnicas sostenibles e incentivos para la incorporación de la sostenibilidad.

El cuestionario consistía en tres partes:

- PARTE 1: Identificación de las GPTs,
  - Identificación de las técnicas y motivos para considerar esas técnicas sostenibles.
  - Identificación de la etapa del ciclo de vida en la que esa técnica puede introducir beneficios.
- PARTE 2: GPTs
  - Para cada técnica, identificación de los impulsores de sostenibilidad más importantes, tales como:
    - conservación de materiales,
    - utilización de subproductos (de otras industrias),
    - reciclado / reutilización,
    - consumo de energía,
    - emisiones de CO<sub>2</sub>,
    - salud y seguridad,
    - ruido y confort para el usuario de la carretera.
    - abastecimiento responsable,
    - demoras del usuario / congestión de tráfico / nivel de servicio,
    - costos del ciclo de vida,
    - costos directos.
- PARTE 3: Restricciones, barreras o incentivos para las GPTs
  - En muchos casos, la introducción de las novedosas técnicas sostenibles es una práctica cuya ampliación se ve obstaculizada o incluso detenida por las restricciones. Ejemplos de estas limitaciones, que pueden lograr que la GPT pueda permanecer en proyecto piloto, son los siguientes:
    - inversiones iniciales para su implementación (por ejemplo , desarrollo de tecnología, personal calificado, proceso).
    - aspectos legales
    - no hay contratos de compra innovadores disponibles, especificaciones restringidas



Abreviatura	Significado
Asfalto reciclado	Uso de (mayor contenido de) áridos reciclados en pavimentos de mezcla en caliente
Bajo ruido	Pavimentos reductores de ruido, como la mezcla bituminosa porosa o las capas delgadas reductoras de ruido. Una nueva superficie de hormigón, o jugar con las propiedades de absorción o textura del pavimento
Mezcla asfáltica a baja temperatura (WMA)	Mezcla bituminosa producida a temperaturas de calentamiento más bajas que la mezcla bituminosa caliente convencional
Empleo de materiales de desecho	Uso de residuos de demolición y construcción y subproductos industriales, en asfalto, hormigón o capas de cimentación, sustitución parcial por material de desecho y regeneración de residuos.
Rejuvenecedores	Uso de rejuvenecedores para prolongar la vida útil y mejorar el reciclado múltiple de un pavimento asfáltico
Reciclado in situ	Reciclaje en frío in situ con cemento o con emulsión bituminosa.
Baja resistencia a la rodadura	Optimización de la superficie del pavimento para obtener una carretera con baja resistencia a la rodadura y, por lo tanto, reducir el uso de combustible del tráfico durante su uso.
Optimización de la construcción	Proceso de pavimentación controlada y/o semiautomática (p. ej. la compactación inteligente, el equipo de nivelación en tiempo real, optimización del proceso de pavimentación mediante equipo especial o técnicas de construcción aceleradas, como la pavimentación sin hilos)
Asfalto en frío	Uso de técnicas de reparación de asfalto en frío basadas en emulsiones para el sellado de superficies y tratamientos superficiales.
Reciclado de hormigón	Uso de materiales reciclados dentro del pavimento de hormigón (en su mayoría 2 capas)
Pavimentos de larga vida (LLP)	Pavimentos de larga vida (es decir, aumentando la vida del pavimento)
Disminución del tiempo de construcción.	Reducción del tiempo de construcción y, por lo tanto, el obstáculo que supone para las personas al especificar el momento de los trabajos o la aplicación de técnicas especiales.
Mejora de la seguridad	Re-texturar la superficie por motivos de seguridad y para aplicar técnicas que mejoren las condiciones de trabajo.
Superficie de hormigón de nueva generación (NGCS)	Re-textura de pavimentos de hormigón para reducir el ruido.
Bio-conglomerante	Utilización de bio-ligantes respetuosos con el medio ambiente.
Optimización de la producción	Medidas energéticas y ecológicas en la planta de producción de mezcla bituminosa.
Optimización del producto final de vida (EOL)	Conjunto de medidas para mejorar la calidad de reutilización y reciclaje.
Licitaciones y evaluación de sostenibilidad.	Contratación pública ecológica y evaluación de niveles de sostenibilidad.
Hormigón permeable	Evitar el escurrimiento excesivo de agua

contenido de cemento reducido	Optimización de la gradación y diseño y uso de material cementoso suplementario.
Etiquetas integradas	Etiquetas integradas para comprobar el prestaciones del pavimento
Adaptación al cambio climático.	Tales como pavimentos reflectantes o de retención de agua.
NOX	Pavimentos descontaminantes de NOx

Tabla 1: Abreviaturas en los resultados del cuestionario.

Alrededor del 50 % de todas las GPTs citadas pertenecen a cuatro clases principales: reciclado de la mezcla bituminosa, temperatura de producción más baja para la mezcla bituminosa, pavimentos bituminosos de bajo ruido y actualización de los materiales al final de la vida útil (EOL). Las GPTs de las tres primeras clases dominantes, así como la mayoría de las GPTs dentro de la clase de materiales de mejora en la fase EOL, se refieren a pavimentos bituminosos.

Al clasificar los resultados según la fase del ciclo de vida, se obtiene que el 50% de las GPTs estan relacionados con la producción. Alrededor del 30% de las GPTs citadas consideran la fase de uso. Predominan las técnicas dirigidas a disminuir el ruido del tráfico en el asfalto y hormigón y reducir la resistencia de rodadura con el fin de reducir la CF del pavimento. Un 20 por ciento de las GPTs mejoran la EOL al reciclar los materiales del pavimento para su uso en el siguiente ciclo de vida o la reposición de los materiales de desecho.

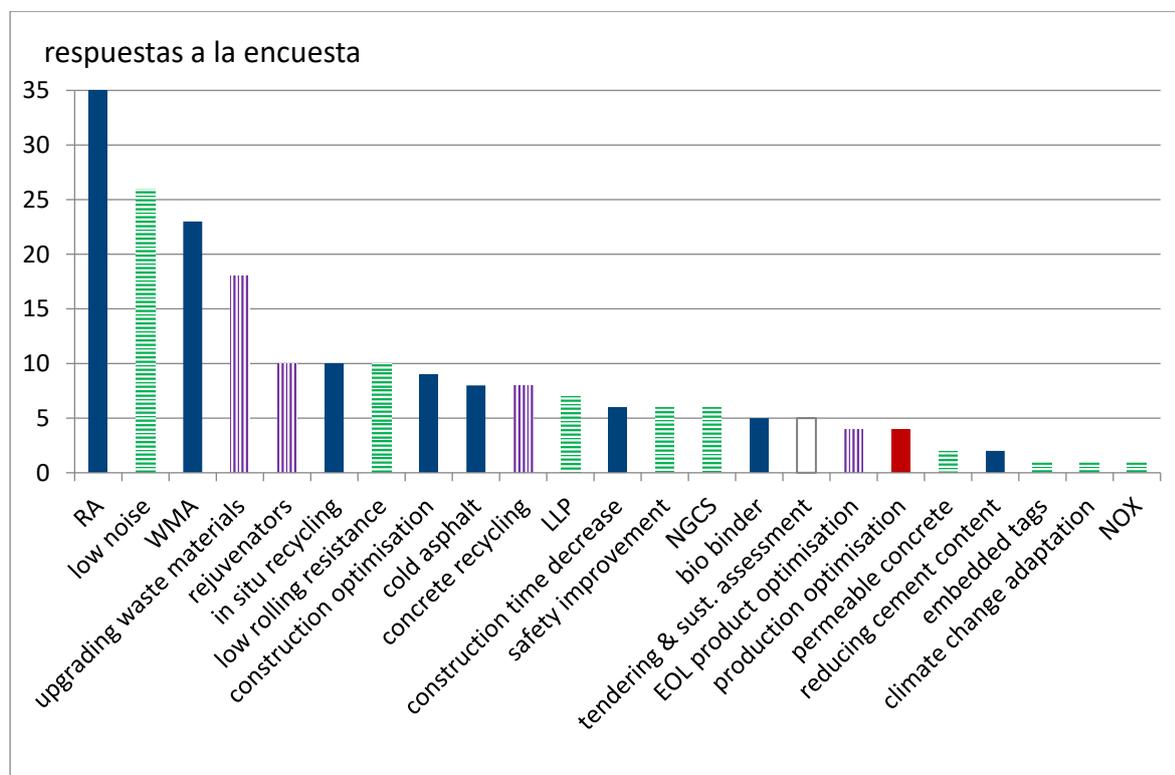


Figura 2: Clasificación de las respuestas de la encuesta e indicación de la etapa del ciclo de vida . ( = fase de producción, = fase de construcción, = fase de uso, = fase de EOL)

Se pidió a los encuestados que identificaran los factores de conducción en las GPTs. En las técnicas identificadas en la Figura 3, las respuestas indican que las cuestiones ambientales parecen estar dirigiendo la mayoría de las GPTs (72 %). Algunos problemas sociales, como el ruido y la seguridad,

aparecen en el 22 % de las técnicas, mientras que el pilar financiero de la sostenibilidad rara vez se identifica como el principal impulsor. Sin embargo, para muchas GPTs en los que haya un controlador ambiental, el tema financiero está estrechamente relacionado, como en la optimización o el extendido de materiales reciclados. Por lo tanto, los ahorros financieros y ambientales, basados en la reducción del uso de materiales vírgenes o en la construcción a menores demandas de energía, ofrecen múltiples beneficios.

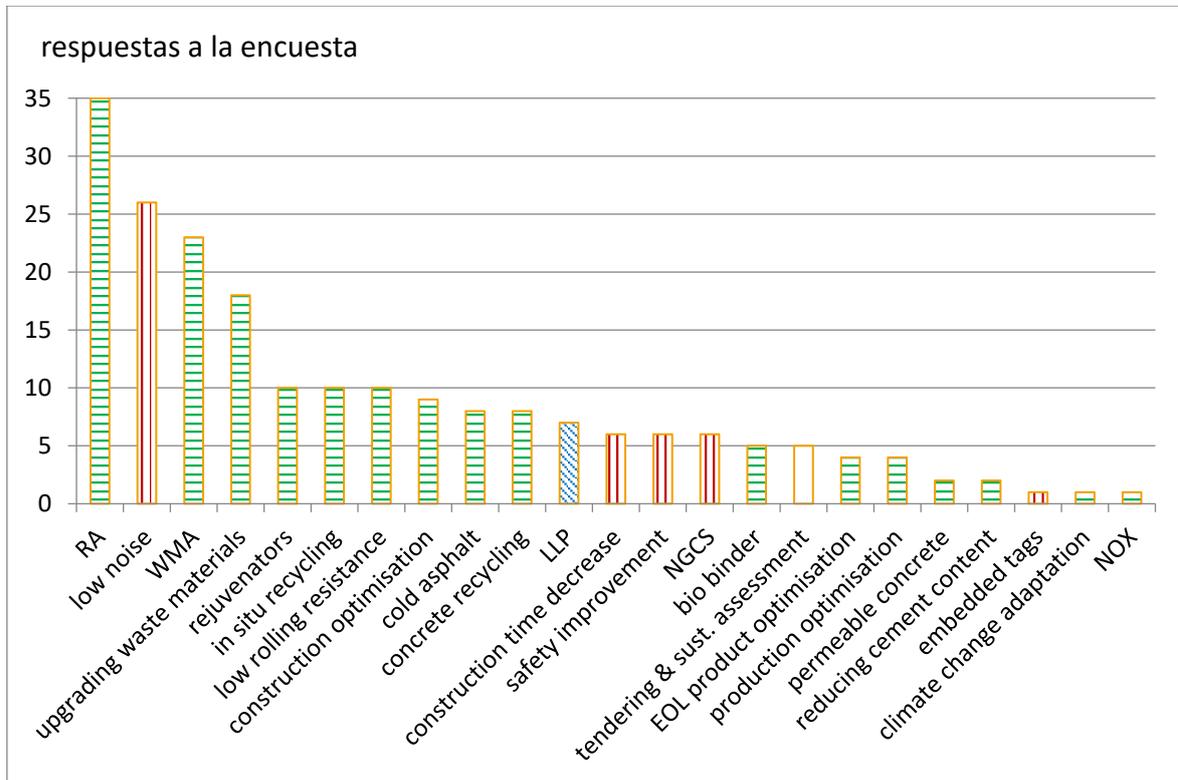


Figura 3 - Clasificación de las respuestas de la encuesta e indicación del pilar de sostenibilidad ( = ambiental, = social, = financiera)

Las GPTs son cada vez más importantes en el sector de la carretera. Muchas de las respuestas de la encuesta vinieron de países desarrollados, pero no está claro si las GPTs se promueven más en estos que en los países medio desarrollados. La mayoría de las GPTs citados están relacionados con el asfalto (casi el 60 %), solo menos del 10 % está relacionado exclusivamente con el hormigón como material de pavimentación. Sin embargo, para poner estos resultados en perspectiva, se debe tener en cuenta que la mayoría de los encuestados se basan principalmente de los pavimentos de asfalto. Las GPTs que se utilizan para reciclar el asfalto, producirlo a una temperatura más baja y la construcción de pavimentos asfálticos de menor ruido son los que se mencionan a menudo.

La mayoría de las GPTs se identificaron en la etapa de construcción del pavimento, aunque también se considera la etapa de uso. Esto último resulta prometedor, ya que muestra que las consideraciones de la etapa de uso están internalizadas en las decisiones de las administraciones de carreteras en el momento de su construcción.

Basándose en las respuestas de la encuesta, hay una indicación de que las razones ambientales impulsan las GPTs, aunque las cuestiones financieras están a menudo estrechamente relacionadas, mucho más que los motivos sociales. Una posible razón puede ser que la cuantificación y

normalización del impacto ambiental en una GPT esté más desarrollado en comparación con los impactos sociales y financieros.

La falta de contratos o licitaciones innovadoras y la resistencia al cambio son mencionados a menudo como un retraso en la introducción de una GPT. Se espera que la promoción de las GPTs a través de incentivos financieros o el uso de proyectos piloto fomente su implementación. Para algunas GPTs, la investigación adicional y los datos a largo plazo se espera que confirmen la efectividad y ayuden a su despliegue. El camino a seguir para un uso más amplio de las GPTs será crear un sistema en el que los riesgos de la innovación se compartan entre las administraciones de carreteras y los contratistas.

Los resultados completos de la encuesta están disponibles en la referencia [2].

## 4. ESTADO DEL ARTE

Un ciclo de vida típico de la estructura de un pavimento se puede dividir en las fases resumidas en la Tabla 2: producción del material, diseño, construcción, fase de uso y EOL. Los siguientes subcapítulos resaltan algunas de las técnicas utilizadas en cada una de las etapas para lograr una mejor sostenibilidad.

Fase del ciclo de vida	Descripción
Diseño del pavimento	Determinación de los requisitos estructurales y funcionales del pavimento y de la composición estructural, la geometría y la selección de materiales adecuados.
Materiales	Consideración de materiales individuales utilizados en proyectos de pavimentación.
Construcción	Todos los procesos y actividades necesarios para la construcción de la nueva estructura de pavimento.
Fase de uso	Operación regular de la estructura del pavimento, incluidas las interacciones con el tráfico y el medio ambiente.
Mantenimiento / conservación	Actividades que se realizan a lo largo de la vida del pavimento que garantizan su servicio.
Fin de vida (EOL)	Retirada y/o eliminación final, reciclaje y reutilización del pavimento según alcanza el final de su vida útil.

*Tabla 2: Fases del ciclo de vida del pavimento.*

Nota: Se identificaron estrategias del estado del arte a partir de los resultados de la encuesta. Las estrategias presentadas en este informe son solo un ejemplo, pero no son una lista completa.

### 4.1. FUNDAMENTOS DE DISEÑO

Un pavimento de la carretera tiene dos funciones básicas: funcionar como una estructura de ingeniería y satisfacer a la vez los requisitos funcionales. Para una prestación estructural, se necesita un espesor suficiente y materiales de calidad capaces de soportar la variedad de cargas que se aplicarán al pavimento durante su vida útil. Para ofrecer un servicio funcional, el pavimento debe proveer una conducción suave y una resistencia al deslizamiento y drenaje suficientes para permitir una circulación segura.

Al diseñar una nueva estructura de pavimento, el diseñador considera el período durante el cual se espera que aguante el pavimento y la carga de tráfico acumulada que se producirá durante ese período de diseño. Desde la perspectiva del diseñador del pavimento, la vida del pavimento se expresa en términos de nivel de tráfico de diseño en lugar de período durante el cual ese tráfico puede darse.

Un sistema de diseño del pavimento no puede garantizar que un pavimento construido funcionará posteriormente según las expectativas de diseño por las siguientes razones:

- Ningún proceso de diseño modela a la perfección el prestaciones de un pavimento real con un entorno y una carga controlada. La variabilidad del mundo real, tanto en el entorno como en la carga, solo agrava este problema.
- Las propiedades de los materiales utilizados como valores de diseño son, por lo general, simplificaciones extremas del comportamiento complejo de los materiales de pavimento y clasificaciones naturales.
- Los procesos de construcción no pueden producir un pavimento que se ajuste completamente a la estructura de diseño ya que, tanto los espesores como las propiedades del material, variarán dentro de cualquier construcción.

Como resultado, el diseño del pavimento se realizan normalmente de forma que haya una alta probabilidad de que el pavimento construido dure más que de que sea necesaria una rehabilitación importante o una sustitución.

#### 4.1.1. Consideraciones del pavimento verde

La confianza del diseñador del pavimento en el material propuesto y las prestaciones del diseño es en gran medida el resultado de experiencias pasadas, ya sea experiencia personal o empírica obtenidas tanto por procedimientos empíricos, como mecanicista-empíricos de diseño.

Una falta de esta experiencia u historial de comportamiento es una barrera importante para la adopción generalizada de nuevos materiales para pavimentos sostenibles (por ejemplo, hormigón con geopolímeros, mezclas bituminosas con alto contenido de plásticos blandos reciclados) y para los conceptos de estructura de los pavimentos (por ejemplo, estructuras de pavimento permeables).

Con respecto al uso de materiales sostenibles y estructuras de diseño, las cuatro áreas principales a considerar para el diseñador son:

- Especificaciones de los materiales
- Propiedades de diseño de los materiales
- Consecuencias no relacionadas con las prestaciones.
- Riesgos y recompensas debidas a las prestaciones.

#### 4.1.2. Especificaciones de los materiales

Tradicionalmente, las especificaciones prescriptivas se han utilizado para garantizar que los materiales seleccionados para su uso puedan fabricarse, manejarse fácilmente en la construcción y tener un comportamiento duradero. Algunos ejemplos bien definidos de ensayos de materiales que se usan a menudo en especificaciones prescriptivas son el índice CBR (California Bearing Ratio), los límites de Atterberg, el grado del betún, su penetración o la viscosidad. Una limitación de las especificaciones prescriptivas es que estos se suelen obtener valores límites de ensayos in situ, para materiales conocidos.

Una alternativa al uso de especificaciones prescriptivas es el uso de especificaciones basadas en el prestaciones, en las que las especificaciones contienen límites en el comportamiento de los materiales. No preocupan los resultados de las pruebas, que no son una medida directa del comportamiento de los materiales, ya sea en el laboratorio o en la plataforma. Para un material bituminoso, las especificaciones básicas basadas en las prestaciones son límites establecidos en el módulo de elasticidad del material, la resistencia a la rodera (o ahuellamiento) y el comportamiento

a fatiga. Para los materiales de hormigón, los límites se basan en la resistencia, el agua y la trabajabilidad.

Los diseñadores que estén considerando nuevos materiales sostenibles deben poder hacerlo dentro del marco de las especificaciones vigentes para el proyecto de construcción. Si las especificaciones prescriptivas prevalecen, entonces el material sostenible debe cumplir con los límites de especificación establecidos. En algunos casos, esto puede resultar difícil ya que el material sostenible puede ser significativamente diferente respecto a las características de los componentes de los materiales tradicionales alrededor de los cuales se establecieron las especificaciones. Sin embargo, la consideración de nuevos materiales sostenibles innovadores dentro de una especificación basada en las prestaciones es algo más fácil, ya que el material debe cumplir con un nivel de prestaciones específico. En conclusión, la adopción de tecnologías de pavimento sostenible es más fácil en un entorno de especificaciones basado en prestaciones que dentro del conjunto de especificaciones prescriptivas tradicionales.

#### **4.1.3. Propiedades de diseño de los materiales**

Un problema similar ocurre al considerar las propiedades de los materiales que se utilizan en el diseño de los pavimentos. Los procedimientos de diseño empírico tradicionales se basan en las prestaciones de materiales conocidos y establecidos. Los nuevos materiales pueden variar significativamente en las propiedades de diseño de los materiales utilizados en el desarrollo del método (por ejemplo, el módulo de diseño); por lo tanto, seguir los métodos convencionales puede resultar en un diseño inadecuado. El uso de materiales de pavimento sostenible en un marco de diseño empírico no es imposible, pero sí requiere que los materiales sostenibles sean generalmente equivalentes en propiedades de diseño que los materiales tradicionales.

Los procedimientos de diseño mecánico-empírico proporcionan un marco más flexible para considerar nuevos materiales, con propiedades de diseño que se determinan utilizando las mismas pruebas que se utilizan para los materiales existentes. También deben seleccionarse las funciones de prestaciones apropiadas que vinculan las tensiones determinadas en el modelo de respuesta a la carga empírico-mecanicista con el rendimiento de campo. Esto puede resultar una tarea sencilla según la naturaleza del material sostenible. Si la composición de un material de pavimento sostenible específico se desvía significativamente de los materiales tradicionales, se debe considerar un programa de investigación que incluya pruebas de prestaciones tanto en el laboratorio como en el campo. El uso de pruebas de pavimento acelerado puede estar justificado.

#### **4.1.4. Consecuencias no relacionadas con las prestaciones.**

El uso de materiales alternativos requiere la consideración de otros aspectos además de las prestaciones del material enfocado a la estructura del pavimento. Ejemplos de problemas a considerar son:

- Los posibles problemas ambientales relacionados con la producción del material (por ejemplo, el uso de vidrio triturado sin lavar en plantas de fabricación de mezclas bituminosas pueden causar la emisión de olores desagradables a las áreas residenciales vecinas)
- Las preocupaciones mediambientales que necesitan mitigarse durante la fase de construcción del material (por ejemplo, el uso de medidas de seguridad para prevenir el

excedente de emulsión para el medio ambiente en la carretera y la rotura del agua de la emulsión cuando se utilizan los riegos de sellado)

- La necesidad de elementos adicionales para el diseño de la carretera más allá de aquellos que conciernen directamente al diseñador del pavimento para garantizar las prestaciones de los materiales y proteger el medio ambiente (por ejemplo, la prevención de la lixiviación durante eventos climáticos extremos)
- Opciones de rehabilitación para nuevos materiales en la EOL (por ejemplo, aunque los residuos de amianto queden potencialmente encapsulados en una estructura de pavimento, se necesitan medidas de seguridad para evitar la exposición del asbesto durante la molienda, estabilización, u otras técnicas de rehabilitación)

La mayor parte de la consideración de este tipo de problemas puede recaer en otras partes dentro de un equipo de proyecto. Sin embargo, el diseñador de pavimentos debe ser consciente de cualquier limitación u oportunidad que pueda afectar a la selección de la estructura del pavimento y el uso de posibles materiales.

#### **4.1.5. Riesgos y recompensas debidas a las prestaciones.**

Un factor clave que afecta la forma en que los proyectos específicos son receptivos a los materiales innovadores son los riesgos, ya sean percibidos o reales, que el uso de nuevos materiales puede traer al proyecto. Los diversos marcos contractuales con los que un diseñador de pavimentos puede operar le proporcionarán diversos grados de asistencia para equilibrar el riesgo y las prestaciones.

Los modelos simples de contrato cliente-proveedor de menor precio (subastas) ofrecen oportunidades relativamente pobres para implementar materiales y soluciones estructurales innovadoras para el pavimento sostenible. Los modelos de contrato tipo alianza ofrecen más oportunidades, ya que todas las partes pueden beneficiarse de los beneficios del uso de materiales innovadores de menor costo, y todas las partes pueden involucrarse en el reconocimiento de cualquier riesgo en el uso de nuevos materiales o soluciones del pavimento.

#### **4.1.6. Pavimentos de larga duración: Ejemplo de pavimento híbrido horizontal.**

Una mayor vida funcional de una carretera tiene un impacto importante sobre la sostenibilidad debido al uso minimizado de los materiales y la energía durante el ciclo de vida. Los pavimentos duraderos reducen el consumo de materias primas, los retrasos del tráfico y las intervenciones necesarias para el mantenimiento. Los pavimentos de larga vida logran una mayor disponibilidad de la carretera, durante un período más largo con menores operaciones de reparación y mantenimiento necesarias. La elección del método de construcción, asfalto u hormigón, influye en la extensión de la vida útil. En principio, los pavimentos de hormigón pueden soportar cargas pesadas del tráfico de camiones, mientras que los pavimentos de asfalto ofrecen ventajas en términos de tiempo de construcción, variabilidad y opciones de reparación. Pero todas las ventajas deben ser combinadas. En Alemania, el método de construcción "híbrido horizontal" para autopistas se desarrolló para este propósito (Figura 4). En este concepto, el primer carril y el arcén altamente cargados están hechos de hormigón, mientras que los carriles restantes, en los que circulan principalmente los automóviles, están hechos de asfalto. Al elegir un tipo de superficie muy duradera en las vías de asfalto (mastic de asfalto), se puede ajustar la vida útil de ambas áreas. Se espera que la vida en servicio supere los 20 años antes de se lleve a cabo la primera actividad importante de mantenimiento. El método de construcción ya se ha utilizado en tramos de las

autopistas A3, A4 y A61. Los detalles de construcción, así como el diseño de la unión entre asfalto y hormigón, se resumieron en un conjunto de reglas técnicas [3].

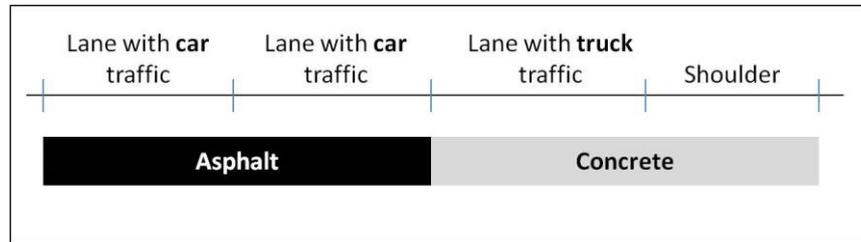


Figura 4: Pavimento de larga vida. Híbrido horizontal de asfalto y hormigón.

## 4.2. MATERIALES

Los materiales del pavimento deben evaluarse desde la perspectiva del ciclo de vida para determinar su contribución en la sostenibilidad de todo el sistema pavimento.

La Tabla 3 resume las estrategias y prácticas para minimizar el consumo de los recursos, la energía y las emisiones asociadas a diferentes materiales de pavimento. Las estrategias consideradas para preservar los materiales naturales y para reducir la energía consumida y las emisiones generadas en la producción mixta pueden clasificarse en dos enfoques principales: estrategias de bajo riesgo (comúnmente aceptadas) y estrategias emergentes. Estas estrategias, identificadas en las respuestas de la encuesta y a través de los miembros de PIARC, se detallan en las siguientes subsecciones.

Las estrategias de bajo riesgo implican una modificación mínima de las propiedades estándar de los materiales y generalmente se ajustan a las especificaciones de los materiales existentes. Los resultados de la encuesta indican que las siguientes estrategias son comúnmente aceptadas:

- Aumentar el uso de los reciclados, los residuos generados o los recuperados. Los ejemplos incluyen: áridos reciclados, mezcla bituminosa reciclada en hormigón, productos industriales para reemplazar el cemento.
- Mayores niveles de polimerización y uso de bio-combustibles.
- Aumentar el uso de calizas Portland y cementos con adiciones.
- El uso de mezclas bituminosas de baja temperatura (WMA).
- Mejoras en el proceso de producción, como el uso de bio-combustibles para la fabricación de mezcla asfáltica (bituminosa).

Las estrategias emergentes se consideran de alto riesgo ya que hay reservas en su empleo a largo plazo, impactos económicos, ambientales y sociales. Este informe resume brevemente tres tecnologías emergentes seleccionadas: mezclas asfálticas recicladas con plásticos blandos reciclados, los pavimentos con vidrio reciclado y los caminos solares.

Impacto en la sostenibilidad	Estrategia / Mejores Prácticas	Objetivo
Producción de áridos	Aumentar el uso de reciclados, sub-productos o materiales de desecho.	Reducción del uso de materiales vírgenes.
Materiales de la mezcla bituminosa	Aumentar el uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y tejas de asfalto recuperado (RAS). Mayores niveles de polimerización y de adición de caucho. Uso de mezclas bituminosas de baja temperatura (WMA).	Reducción o reemplazo de ligante virgen. Mejora de la seguridad mediante el aumento de la reflectividad de la superficie y reducción del ruido. Desarrollo de ligantes adecuados para la pavimentación, que mejoren el soporte estructural y prolongen la vida de las mezclas bituminosas. Reducción de la energía consumida y de las emisiones generadas en la producción de la mezcla.
Materiales del hormigón	Uso de los graduaciones mejoradas de de los áridos. Incrementar el uso de caliza Portland y cemento con adiciones. Reducción del uso del agua en la producción de hormigón. Incremento en el uso de hormigón recuperado y áridos reciclados. Avances de la durabilidad del hormigón.	Reducciones en los niveles de energía y emisiones durante la producción del ligante primario: el cemento. Ahorrar agua como recurso.

Tabla 3: Las estrategias para minimizar los recursos, la energía, y las emisiones [4].

#### 4.2.1. Áridos reciclados

Los áridos constituyen la mayor parte de la masa y el volumen en una estructura de pavimento y, por lo tanto, presentan un impacto significativo en la sostenibilidad del pavimento. En los últimos años, ha habido un clamor de que el uso de los materiales de construcción vírgenes es más rápido de lo que se pueden reponer. Esta práctica no es sostenible; por lo que, la conservación de los materiales vírgenes es inminente. Las limitaciones de prestaciones de los materiales recuperados y la falta de prácticas de reciclaje estándar pueden dificultar la aceptación del reciclado y la aplicación de estos áridos como materiales de construcción de carreteras. Otras consideraciones cuando se aplican estos materiales reciclados incluyen los procesos de control de calidad y la gestión de almacenamiento. El estudio presentado a continuación proporciona cierta evidencia de que se está aplicando esta estrategia.

Además de los cambios en las propiedades de la mezcla introducidos por la aplicación de áridos reciclados, hay otras preocupaciones importantes, como el tiempo de curado en los pavimentos de hormigón o el esfuerzo de compactación en los pavimentos de mezcla bituminosa, que deberían

ser reconocidas. A menudo, la decisión de utilizar áridos reciclados depende de los costes operacionales de los materiales vertidos, del coste de empleo de cada sitio, la disponibilidad de materiales, y otros factores que impactan en los costes generales del proyecto. Un requisito general que exija el uso de áridos reciclados no resulta beneficioso para cumplir los objetivos de sostenibilidad. La disponibilidad de materiales y los requisitos de prestaciones deben ser considerados para cada proyecto.

#### **4.2.1.1. Uso del árido reciclado: caso de estudio**

El Departamento de Transporte y Obras Públicas de Western Cape, en Sudáfrica, utilizó el árido reciclado del hormigón y el RAP en un proyecto de la Ruta Nacional N2 entre Borchers Quarry Road y Swartklip Interchange. El pavimento de hormigón se demolió y el hormigón recuperado y la mezcla asfáltica se trituraron y se mezclaron para cumplir con las especificaciones de la Agencia. Cuando fue posible, en las capas de subbase se empleó un 100 % de árido reciclado con un 3 % de cemento en la estabilización. Los requisitos específicos para cualquier subbase tradicional se mantuvieron con el material reciclado. En este estudio, un total de 18 000 m<sup>3</sup> de fresado de hormigón y asfalto se retiraron de la carretera y se volvieron a utilizar en el sitio. El cliente informó que en este proyecto se logró un ahorro de unos 11.500.000,00 ZAR (820.000,00 USD).

Para determinar las propiedades y los parámetros críticos del material recuperado del proyecto de la N2 [5] se realizaron ensayos triaxiales a carga constante y variable, con una escala de tiempo y exposición variables. La prueba se llevó a cabo en diferentes pavimentos con árido reciclado empleado en el hormigón (RCA) y comparado con estructuras de referencia hechas con materiales tradicionales. El análisis reveló que el material RCA se desempeña satisfactoriamente como capa base o subbase dentro de la estructura del pavimento.

#### **4.2.2. Asfalto reciclado en el hormigón**

El uso de RAP en pavimentos asfálticos es ampliamente conocido y practicado, sin embargo, el uso potencial de RAP en pavimentos de hormigón realizado con cemento Portland (PCC) aún no se ha implementado. El material obtenido por el fresado de los pavimentos de asfalto conocidos como RAP es típicamente separado y seleccionado. Las partículas más finas (que pasan por el tamiz de 4,75 mm) tienen mayor contenido de ligante bituminoso, que puede proporcionar mayores niveles de reemplazo del ligante líquido cuando se utilizan en una nueva mezcla asfáltica en caliente (en adelante HMA). Por el contrario, las partículas más gruesas se cubren con menos ligante y, por lo tanto, son menos adecuadas para mezclar en un HMA, pues permite la formación de grandes reservas de RAP grueso no utilizado [6]. Por lo tanto, la investigación de los usos alternativos de la fracción RAP gruesa, así como el reemplazo parcial del árido vírgen en el hormigón de cemento portland (en adelante PCC), merecen cierta investigación. Este material grueso se conoce también como pavimento fraccionado de mezcla bituminosa reciclado (en adelante FRAP) y se ha utilizado en varios proyectos, como se describe a continuación. Un estudio de Brand y Roesler centrado en la investigación de diferentes dosis de FRAP en el pavimento de hormigón indicó que, si bien pueden observarse una disminución en las características mecánicas y de durabilidad, las mezclas preparadas con un contenido de hasta el 50 % de FRAP aún se ajustan a las especificaciones existentes [7]. En un estudio diferente, las losas de hormigón a gran escala con diferentes áridos reciclados se moldearon y probaron para determinar la capacidad de flexión. Los resultados demostraron que el hormigón con un 45 % de FRAP tiene una capacidad de carga de flexión

comparable a la del pavimento realizado con áridos vírgenes, lo que confirma su aplicabilidad como pavimento de hormigón [6].

#### **4.2.2.1. Asfalto reciclado en el hormigón: caso en estudio**

En los EEUU, ha habido varios estudios de campo utilizando RAP en el hormigón. Concretamente en Iowa en 1976 [8], en Kansas en 1997 [9], y en Austria en 1991 y 1993 [10]. En todos estos proyectos, el pavimento de hormigón se construyó en dos capas, utilizándose el RAP como árido grueso en la capa inferior.

Un ejemplo de un proyecto más moderno con el uso de FRAP en hormigón es el de Illinois Tollway [11]. Este estudio demuestra que la técnica anterior es una opción viable para las autoridades viales cuando se dispone de grandes reservas de FRAP. Como parte del proyecto, se construyó un nuevo pavimento bi-capa, con la capa inferior con 228 mm de hormigón con FRAP, y la capa superior de 76 mm de HMA.

Antes de su colocación en el campo, se inició un estudio de laboratorio para investigar diferentes niveles de reemplazo de áridos gruesos con FRAP, así como el efecto del lavado que se producía con el FRAP antes de la mezcla. Los resultados de laboratorio indicaron que los niveles de reemplazo eran factibles hasta 50 % y no influían negativamente en las propiedades mecánicas. Los efectos del lavado se mostraron menores. Sobre la base de estas pruebas de laboratorio, se desarrollaron especificaciones para el proyecto de Illinois Tollway para secciones de pavimento compuesto, así como para secciones de pavimento de hormigón con la adición de FRAP en la capa inferior. Los beneficios clave de esta práctica son los ahorros en términos de eliminación, energía de arrastre y conservación de los áridos vírgenes, todos asociados con beneficios ambientales. La experiencia de campo indicó que debe tenerse en cuenta el tiempo de curado, tiempo que debe extenderse antes de abrir los pavimentos al tráfico, especialmente cuando se utiliza un alto porcentaje de FRAP.

#### **4.2.3. Producción de asfalto y Bio Combustibles**

Una planta de producción de mezcla asfáltica es un gran consumidor de energía, especialmente durante el proceso de secado y calentamiento de los áridos. Dependiendo de factores tales como los niveles de precios y los subsidios, el tipo de combustible utilizado varía entre los diferentes productores y países (puede ser combustible pesado, polvo de carbón marrón, gas propano, etc.). La fuente de energía utilizada en la planta tiene una influencia sustancial en la huella de la producción de mezcla bituminosa. Una empresa dedicada a este asunto, incluyendo los resultados de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD), aumentarán claramente el conocimiento del clima de la industria (véase capítulo 5). En muchos países está aumentando la transferencia de fuentes de energía fósil a renovable.

##### **4.2.3.1. Producción de asfalto y bio-combustibles: caso en estudio**

En Escandinavia, los contratistas están ahora reemplazando los aceites tradicionales de los quemadores con bio-aceites o pellets de madera. La Figura 5 muestra los resultados de la producción de un contratista en el período de enero de 2015 a diciembre de 2017. Este contratista introdujo los bio-aceites (aceites residuales de la industria alimentaria) como fuente de calefacción en lugar del aceite de combustión tradicional en 2015, y para finales de 2017 la huella de carbono de la producción, expresada como equivalente de CO<sub>2</sub>, se había reducido en un 61 %. El uso de RAP también contribuyó a la reducción, pero en menor medida, que el cambio del combustible empleado en la producción. Estos resultados indican claramente las mejoras ambientales obtenidas

a través de una actualización de los equipos y de la maquinaria de los productores de mezclas bituminosas a una opción de combustibles más sostenibles.

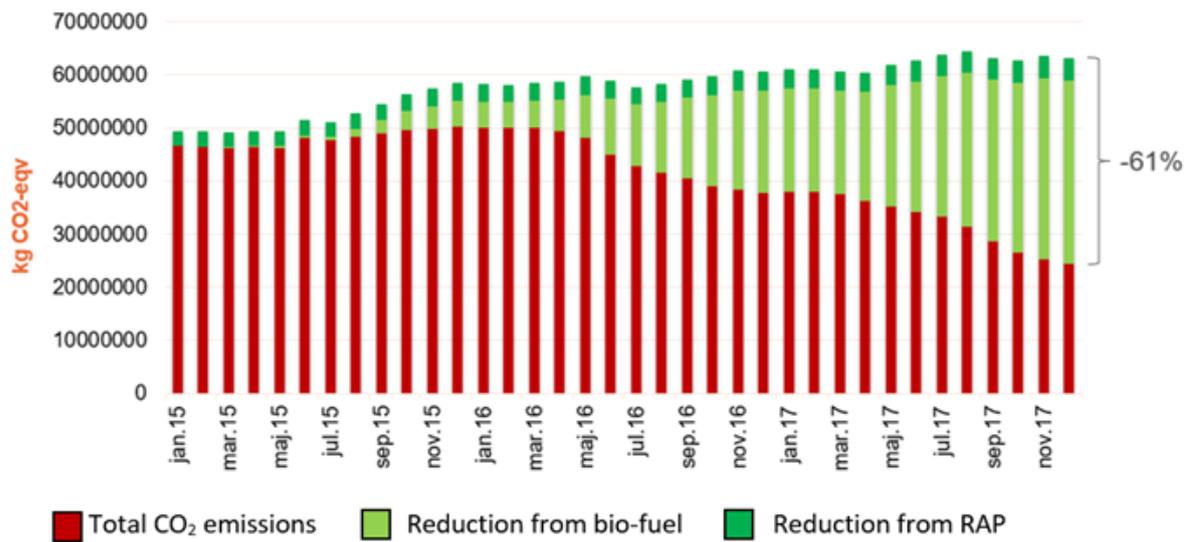


Figura 5: Ejemplo de los efectos del uso de biocombustibles y RAP en la producción de mezclas bituminosas. Los resultados son emisiones acumuladas en equivalentes de CO<sub>2</sub> en el promedio de 12 meses de 14 plantas. (Fuente: PEAB Suecia).

#### 4.2.4. Cementos con adiciones (mezcla)

Cada año se producen aproximadamente 10 mil millones de toneladas de hormigón [12], por lo que la reducción de los impactos ambientales asociados al hormigón merece una especial atención. El cemento Portland es el componente del hormigón con una mayor huella ambiental, principalmente en términos de consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>. Según Choate (2003), la producción de cemento Portland representa el 73 % del consumo de energía y el 81 % de la emisión de gases de efecto invernadero (en adelante GHG) de las industrias del cemento y del hormigón [13]. La fabricación de cemento Portland conlleva el procesamiento de materias primas, principalmente minerales de piedra caliza, en el horno a temperaturas que van desde 1350 a 1450 ° C, formándose así el clinker de cemento. Las emisiones procedentes del consumo de combustible necesario para este proceso son inferiores al 50% del total, previniendo la mayor parte de las emisiones que se producen como consecuencia de la descomposición de la piedra caliza en cal y dióxido de carbono [14]. Por lo tanto, cualquier mejora en la eficiencia del horno puede proporcionar solo una reducción parcial en la huella ambiental de la producción de cemento. En consecuencia, se ha reconocido que la reducción en el uso de cemento es una estrategia eficiente para mejorar las cargas ambientales del hormigón. La utilización de una granulometría ajustada de los áridos proporciona soluciones prometedoras, ya que permite reducir el contenido de pasta en la mezcla de hormigón. Además, una sustitución parcial del cemento por adiciones directas al hormigón también tiene el potencial de compensar los impactos asociados con la producción de cemento.

Los materiales suplementarios del cemento (en adelante SCM) son típicamente subproductos industriales que están en forma de polvo (y por ello compatibles con el cemento Portland) y se caracterizan por su reactividad hidráulica o puzolánica, o ambas [15]. La reacción puzolánica también se conoce como hidratación secundaria y representa el proceso en el que el hidróxido de calcio se transforma en hidrato de silicato de calcio, que crea una microestructura refinada y mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad [16]. Como ya se mencionó, los SCM se pueden usar

para reemplazar una porción de cemento, sin embargo, las opciones premezcladas, conocidas como cementos con adiciones, resultan una mejor solución también disponible. Estos cementos con adiciones se producen en un ambiente industrial controlado y por eso tienen una calidad uniforme. Los SCM más utilizados en el pavimento de hormigón son las cenizas volantes y la escoria, mientras que las puzolanas naturales o la arcilla calcinada son menos comunes [4].

Los cementos con adiciones (mezclados) generalmente contienen clinker molido con cenizas volantes, puzolanas naturales, escorias, piedra caliza o una combinación de ellas. Las mezclas combinadas binarias contienen un constituyente principal además del clinker, mientras que las mezclas ternarias presentan una mezcla de clinker con dos constituyentes principales. En los EEUU, se especifican cuatro tipos de cemento con adiciones en AASHTO M 240 [17]: Cemento Portland-puzolana (IP), Portland-escoria (IS), Portland-caliza (IL) y Ternario (IT). Los porcentajes de reemplazo del clinker comúnmente utilizadas son de 10 al 12 % para IL, de 15 a 25 % para IP y de 30 a 50 % para IS, mientras que la composición de la mezcla ternaria puede variar según los constituyentes [18]. En Europa y Canadá, los cementos combinados con caliza se han utilizado durante un par de décadas, siendo la proporción de reemplazo de clinker más común con caliza del 20 % en Europa y del 15 % en Canadá [4]. La Asociación del Cemento de Canadá ha estimado que el 15 % de reemplazo produce hasta el 10 % en emisiones de dióxido de carbono [19]. Además, el cemento mezclado con caliza se incluye en la EPD de la industria que describe la producción canadiense [20].

Cabe destacar que la reducción exacta de los impactos ambientales inducidos por el uso de SCM depende de la categoría de impacto y, lo que es más importante, de la metodología de asignación seleccionada. El mayor interés en el uso de SCM en el hormigón ha cambiado el estado de estos materiales de los productos de desecho a coproductos de los respectivos procesos de la industria. En consecuencia, una parte de la carga ambiental debe asignarse a estos materiales y tomarse en consideración en la evaluación del ciclo de vida hormigón (LCA). Un estudio de Chen et al. (2010) demuestra que la decisión de utilizar la asignación masiva frente a la económica tiene una influencia sustancial en los impactos ambientales de la escoria y las cenizas volantes y que ambos métodos de asignación tienen ventajas y desventajas [21]. En consecuencia, debe interpretarse con cautela cualquier reducción relativa de los impactos ambientales introducidos por el uso de cemento mezclado.

#### **4.2.5. Mezcla bituminosa de baja temperatura**

La mezcla bituminosa de baja temperatura (en adelante WMA) consiste en la fabricación y pavimentación de mezclas bituminosas a temperaturas significativamente más bajas que las HMA convencionales, al tiempo que se mantiene, o incluso se supera, la calidad de las mezclas de HMA convencionales [22]. La WMA se produce normalmente a temperaturas de hasta 50 ° C más bajas que las HMA tradicionales. Las mezclas asfálticas son transportadas a menudo en largas distancias y hay cierta probabilidad de retrasos debidos al tráfico. La ventaja de las WMA es que en la mezcla se mejora la trabajabilidad y se puede compactar a la densidad requerida a temperaturas más bajas, lo que mejora su empleo incluso después de un transporte prolongado o en condiciones de baja temperatura. Otro beneficio es que las menores temperaturas de estas WMA reducen las emisiones, permite extenderse en cualquier estación, ayuda a la compactación y proporciona mejores condiciones para los trabajadores debido a la reducción de humos.

Las reducidas temperaturas de la WMA pueden reducir el envejecimiento del ligante durante la producción y extendido y dar como resultado una mayor durabilidad, resistencia a la fatiga y

agrietamiento por envejecimiento. Esto mejora las prestaciones del pavimento a medida que aumenta el período entre las intervenciones de mantenimiento, lo que reduce los costos del ciclo de vida y el uso de recursos no renovables. Sin embargo, el alcance de la reducción de los costos del ciclo de vida debe verificarse mediante una evaluación del pavimento a largo plazo.

La tecnología WMA reduce la viscosidad del ligante, lo que permite recubrir los áridos a temperaturas más bajas. La fabricación de WMA supone la aplicación de tecnologías WMA directamente en el tambor de mezclado o molino, o con la adición en el ligante bituminoso. Con la producción de WMA a temperaturas más bajas, hay menos posibilidades de que los áridos y la RAP se sequen por completo, aunque se debe prestar atención a la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. Si la prueba muestra cierta susceptibilidad a la humedad en los WMA, se pueden usar rellenos activos como la cal hidratada, la adhesión de amina o agentes anti-stripping.

Muchos países han utilizado la tecnología de mezcla bituminosa a bajas temperaturas, extendiéndose de forma generalizada en algunos casos. Hacia sistemas de pavimentos sostenibles por FHWA: un documento de referencia confirma el uso exitoso de WMA en los Estados Unidos [4]. La Gaceta Oficial del Distrito Federal (Boletín Oficial de la Ciudad de México) nº 1683 establece la obligación de que solo se utilice WMA en todos los proyectos de pavimentos propuestos/nuevos. En la ruta Sani Pass en Kwa-Zulu Natal, provincia de Sudáfrica, cerca de la frontera de Lesotho, en 2012 las mezclas de WMA contienen hasta un 40 % de asfalto recuperado que utiliza ambos ligantes: betún de penetración y ligantes modificados con polímeros, producidas y pavimentadas con éxito. La mezcla WMA se fabricó a 165° C en Sudáfrica estando 5 horas en Shongweni y 2 horas in situ. En el Foro de Pavimentos Viales de Sudáfrica de noviembre de 2018, se informó que hasta el presente se han pavimentado un millón de toneladas de WMA en los 3 niveles de clientes.

#### 4.2.6. Bio-ligantes

Los ligantes de betún tradicionales se derivan principalmente de los combustibles fósiles. Dado que el petróleo se está convirtiendo en un recurso limitado, existe la necesidad de considerar alternativas más sostenibles, como los bio-ligantes. Algunas fuentes de bio-ligantes proceden de productos de desecho de recursos bi-renovables como los cultivos y los desechos de animales. Ya que los bio-ligantes son relativamente nuevos en su aplicación, resulta imprescindible la investigación y caracterización con el fin de desarrollar buenas prácticas para su uso. Actualmente se están realizando estudios sobre estos temas en muchos países.

Los Estados Unidos han estado investigando los ligantes biológicos durante varios años. La Circular E-C165 del Transportation Research enumera varios tipos de alternativas de ligantes, a la vez que alienta su investigación y la obtención de pruebas adicionales para evaluar las prestaciones del ciclo de vida completo, la conformidad con las especificaciones y las propiedades clave de la ingeniería (por ejemplo, la composición química, las características de envejecimiento, la susceptibilidad a la humedad) [23].

Como parte de **InfraVation (Infraestructura + Innovación)** programa financiado por la Unión Europea y las administraciones de carreteras de Europa, se ha realizado un estudio sobre los bio-ligantes en 2016-2018. El estudio, llamado *BioRePavation* ha investigado sobre los ligantes alternativos en el reciclaje de asfalto. El alcance principal del Proyecto BioRePavation fue demostrar que los ligantes alternativos podrían utilizarse con el mismo nivel de prestaciones y capacidad de reciclaje que las soluciones convencionales con betún procedente del petróleo. Se evaluaron tres materiales alternativos diseñados para el reciclaje:

- Un aditivo de base biológica de la química del pino diseñado para aumentar el contenido de asfalto reciclado al 70 %, incluso en teoría al 100 %
- Un aditivo de base biológica diseñado para aumentar la compatibilidad entre el betún fresco y el asfalto reciclado.
- Un bio-betún diseñado para el reemplazo total de betún fresco.

En el Instituto Francés de Ciencia y Tecnología de Transportes (IFSTTAR 's) se comprobaron diferentes mezclas de base/soluciones novedosas de pavimento usando estos bio-materiales, acelerando las facilidades de pruebas de pavimentación en Francia. La idea era evaluar las prestaciones, tanto por la medición del nivel de tráfico necesario para la solución de pavimento para llegar a una situación de peligro, como por investigar la evolución fisicoquímica del ligante. La biorepavación también evaluaba los impactos ambientales del uso combinado de bio-aglomerantes y el alto contenido de asfalto reciclado en mezclas asfálticas. Especial atención se ha dado a las emisiones en el aire que podrían ser medidas directamente en el laboratorio. Los datos obtenidos se utilizaron para realizar una evaluación de riesgo y un análisis del ciclo de vida para las tecnologías de Biorepavation.

Después de 30 meses de trabajos de colaboración, los resultados se pueden resumir en los siguientes:

- Se han evaluado completamente, caracterizado y cuantificado la interacción físico-química entre el ligante envejecido, los biomateriales y el betún fresco a partir de pruebas completas de laboratorio.
- El proyecto ha demostrado el efecto rejuvenecedor de los biomateriales a nivel de laboratorio. Las mezclas fabricadas con los tres biomateriales han demostrado una excelente resistencia a las deformaciones a altas temperaturas, una resistencia superior a las fracturas a bajas temperaturas y una buena vida de fatiga a una temperatura intermedia.
- La durabilidad de las mezclas en términos de evitar rodadas (ahuellamientos) y fatiga, evaluada utilizando las instalaciones de prueba del pavimento acelerado, fue muy buena. Los materiales innovadores se comportaron mejor que la mezcla de referencia, comúnmente utilizado en Europa para capas base de altas prestaciones (Mezclas de Módulo Elevado 2, EME2).
- Se ha demostrado que es posible fabricar estas mezclas en una planta de mezcla bituminosa convencional y colocar y compactar las mezclas con un 50 % de asfalto reciclado al tiempo que se reduce la cantidad de betún fresco (hasta el reemplazo total).
- Los resultados del análisis del ciclo de vida muestran que las tres tecnologías de BioRePavation reducen el consumo de recursos no renovables.

En resumen, el proyecto BioRePavation ha demostrado que es posible construir carreteras utilizando una alta tasa de reciclaje e involucrando biomateriales como aditivos o alternativas a las mezclas de betún. Las tecnologías están listas para ser probadas en la red real como capas estructurales o intermedias. Más detalles están disponibles en <http://biorepavation.ifsttar.fr/>.

#### 4.2.7. Tecnologías emergentes

Este apartado reflexiona sobre varias tecnologías emergentes en el ámbito de los materiales de pavimento, que incluyen los caminos de plástico, los caminos de vidrio y los caminos de paneles solares. Esta lista no es exhaustiva de ninguna manera; las tecnologías presentadas se proporcionan

como un ejemplo ilustrativo del uso de enfoques innovadores para resolver los problemas actuales. Conviene indicar que estas soluciones no son parte de la práctica actual, sino ejemplos de soluciones novedosas para pavimentos.

Así, se están considerando diferentes tipos de plástico para su uso en pavimentos asfálticos: plásticos del grupo de poliolefinas, suministrados en forma de gránulos con un tamaño de grano de alrededor de 4 mm y áridos en la planta durante la producción de mezcla bituminosa. Los aditivos plásticos se pueden producir a partir de las nuevas materias primas, así como los residuos plásticos procesados, como el embalaje o el recubrimiento de cables eléctricos. Estos aditivos se suelen utilizar en la mezcla a temperatura de unos 170° C, aunque según el tipo de aditivo y su cantidad, puede que deban extenderse. La compactación de la mezcla modificada se suele realizar a 110 - 120° C. La tecnología de la vía plástica se ha utilizado con éxito en India y Australia; aunque no obstante, queda mucho por hacer para investigar algunas de las preocupaciones sobre la implementación de esta tecnología. Así, se debe investigar a fondo antes de su uso la influencia en el comportamiento del pavimento y algunas propiedades de la mezcla asfáltica, tales como el comportamiento a bajas temperaturas, la resistencia a la fisuración por fatiga o su durabilidad, también aplicable a la reciclabilidad de la mezcla asfáltica modificada. Además, los beneficios ambientales de esta práctica deben ser confirmados por la evaluación específica.

Debido al reciclaje y recuperación de los residuos de vidrio, algunos países están considerando su uso en pavimentos. Los países que llevaron a cabo las secciones de prueba de vidrio-asfalto son Australia, Nueva Zelanda, Taiwán, Japón y Reino Unido. Esta solución es más aplicable para áreas en las que se encuentran almacenados los finos de vidrio triturado reciclado (menos de 5 mm). Las preocupaciones con el uso de vidrio de desecho incluyen una mayor susceptibilidad a la remoción y al desbaste, al contenido de materiales nocivos en el vidrio de desecho recuperado, a la adhesión reducida en el betón y en la interfaz del vidrio, y la posible pérdida de resistencia al deslizamiento. Un estudio realizado por Theresa Bernadette George investigó una HMA con la adición de vidrio triturado reciclado [24] y entre los hallazgos de este estudio, se revela que las prestaciones mejoradas (es decir, la rigidez y la resistencia a la deformación permanente) podría lograrse con el uso de vidrio triturado reciclado en mezclas de base de asfalto de grado continuo en Sudáfrica. En el dominio de PCC, se está investigando actualmente el uso potencial de polvo de vidrio residual como SCM [25, 26].

La tecnología de caminos solares (en adelante SR) implica el uso de paneles solares modulares como revestimiento del pavimento. Esta tecnología se encuentra en las etapas del prototipo y las secciones de prueba realizadas hasta el momento indican algunos beneficios potenciales. Los paneles solares pueden generar lo suficiente para alimentar las señales de tráfico y posiblemente el alumbrado público. En muchos países en desarrollo, la interrupción del suministro de electricidad es una realidad, y la electricidad almacenada en paneles solares de carreteras puede ser cosechada y utilizada para iluminar señales de tráfico y/o edificios adyacentes. Se construyeron secciones de prueba de caminos solares (SR) en Quayside 307 de Toronto (adoquines modulares hexagonales), en Francia (en el pueblo de Tourouvre en Normandía) y en los Países Bajos (Krommenie y Nuenen), además de una sección de prueba pavimentada con paneles solares, sensores de mapeo y recarga de baterías eléctricas construida en la ciudad de Jinan, en el este de China. Algunas preocupaciones asociadas con los caminos solares (SR) son los altos costos de instalación, la reducida fricción, lo concerniente a la limpieza, el mantenimiento y la reparación de estos caminos SR, así como las juntas entre los paneles.

#### 4.2.8. Consideraciones adicionales

Algunas de las tecnologías emergentes especificadas implican el uso en los pavimentos de materiales de desecho de otras industria, que chocan con los principios de la economía circular (en adelante CE). La economía circular es la base en la minimización del uso de recursos y la correspondiente producción de residuos cerrando y estrechando los bucles económico, energético y ambiental de los flujos de procesos diferentes. Por lo tanto, las prácticas de gestión de residuos para cada tipo de material deben crearse teniendo en cuenta estos principios.

Además, antes de una implementación más amplia de cualquier material nuevo o GPT's en el pavimento, se deben considerar las siguientes cuestiones:

- ¿Cómo influye el nuevo material / GPT en las propiedades físicas, mecánicas, de durabilidad y prestaciones del pavimento?
- ¿Cómo influye el nuevo material / GPT en la seguridad?
- ¿Existe evidencia de prestaciones a largo plazo y durabilidad de la técnica implementada?
- ¿Qué ajustes se deben hacer a la práctica de la construcción para asegurar una colocación adecuada?
- ¿Cuáles son los requisitos de conservación / mantenimiento / rehabilitación para un uso exitoso a largo plazo?
- ¿Cuáles son las opciones de EOL? ¿El nuevo material es reutilizable o reciclable?

Hay que tener en cuenta en cuenta que, aunque esta no es una lista exhaustiva de preguntas, proporciona un marco general para evaluar el potencial de implementación con éxito de la nueva tecnología. Si no se pueden identificar respuestas satisfactorias a las preguntas anteriores, antes de la implementación, se deben realizar actividades adicionales de investigación y desarrollo.

### 4.3. CONSTRUCCIÓN

La fase de construcción abarca todas las actividades y procesos asociados con la construcción de nuevos sistemas de pavimentación, así como las actividades de mantenimiento y rehabilitación. Para los fines de este informe, el mantenimiento y la rehabilitación se tratan en la Sección 4.5. La fase de construcción está asociada con el uso de equipos de construcción, la ejecución de diversos procesos de construcción y la formación de la zona de trabajo. En consecuencia, deben incluirse en las consideraciones de sostenibilidad todas las emisiones asociadas con el consumo del combustible y las diferentes actividades en la zona de trabajo, así como el retraso del tráfico debido a los procesos de construcción.

La fase de construcción se puede dividir en fases:

- Fase preparatoria
- Operaciones de construcción
- Evaluación de la calidad del trabajo realizado.

#### 4.3.1. Fase preparatoria

El trabajo preliminar para organizar el proceso de construcción debe iniciarse temprano, de tal manera que exista el mayor potencial para reducir estratégicamente los impactos de la construcción. Se deben considerar los siguientes aspectos, después de decidir el alcance del proyecto y otros detalles:

#### **4.3.1.1. Localización**

Si el proyecto se lleva a cabo en una zona en la que podría dar lugar a graves perturbaciones del tráfico o a dificultades de provisión de los materiales en el sitio, deberán realizarse esfuerzos para mitigar estos impactos negativos: por ejemplo, trabajando con el tiempo de descanso y/o durante la noche se podría reducir el tiempo de traslado del material. La implementación de estas estrategias requiere una buena organización en el lugar de construcción, con el objetivo de, en algunos casos, tener equipos en espera para compensar cualquier falla de las máquinas críticas, para el progreso oportuno del calendario de trabajo. Es posible prever diversas soluciones en las especificaciones de las obras para facilitar la mejora de la huella ambiental de la construcción. Los ejemplos incluyen el incentivo financiero logrado por la reducción del tiempo de obra de construcción (bono por adelantado) o la fecha límite en los días fijos del calendario. Además, el trabajo debe anunciarse de manera oportuna, para que los usuarios estén informados y planeen rutas o modos de transporte alternativos. Los trabajos deben realizarse sin prisas y urgencias para producir un producto final duradero y de calidad.

#### **4.3.1.2. Optimización de los movimientos de suministro del sitio.**

Combinar las actividades en dos o más sitios en un perímetro cercano permite que se puede ayudar a limitar el recorrido en vacío de los camiones de suministro. La agrupación estratégica de proyectos y actividades de construcción puede ayudar a acelerar la entrega del proyecto, ahorrar recursos financieros y realizar la construcción de una manera más respetuosa con el medio ambiente.

#### **4.3.1.3. Uso de equipos y prácticas de construcción más sostenibles.**

El equipo de construcción debe seleccionarse de modo que se adapte mejor al tamaño de la tarea a realizar. Además, en el mercado están surgiendo diferentes tipos de equipos de construcción ecológicos, como los camiones de doble pared para el transporte de la mezcla bituminosa. La nueva maquinaria ha mejorado la eficiencia y el consumo de combustible, mientras que algunos de los equipos pueden operar con aceites biológicos (y no minerales) y biodegradables, reduciendo las emisiones. La concienciación de los trabajadores y las prácticas generales también permiten cierta mitigación de los impactos ecológicos. Ejemplos de prácticas beneficiosas son reducir el tiempo de las máquinas al ralentí , cubrir los vehículos antes de transportar el material para evitar la contaminación con materiales en polvo y el enfriamiento de productos calientes o el uso de equipo con la potencia adecuada para llevar a cabo la tarea (la capacidad del motor).

#### **4.3.1.4. Planificación del sitio según la temporada.**

Las condiciones climáticas pueden influir enormemente en la calidad final de la estructura. La planificación del trabajo debe tener en cuenta el mejor momento del año para llevar a cabo el trabajo con el objetivo de que permita reducir al mínimo las detenciones constructivas debido a las inclemencias del tiempo. Además, la temperatura ambiente durante las actividades de pavimentación de hormigón y asfalto influye en la calidad final del pavimento. Por lo tanto, es necesario planificar el tiempo de construcción de manera estratégica para lograr la calidad óptima de la construcción y así minimizar la necesidad de futuras reparaciones.

#### **4.3.1.5. Almacenamiento de materiales**

La planificación de las opciones de almacenamiento de material en el sitio y en las plantas también puede generar ahorros de energía en las operaciones futuras. Por ejemplo, el uso de grava seca en la producción de mezcla bituminosa hace posible ahorrar combustible durante su mezcla. Por lo

tanto, se recomienda almacenar grava natural o reciclada al abrigo de la lluvia. El almacenamiento de las existencias de material debe prever una entrega rápida al lugar de producción y garantizar la calidad de los productos almacenados durante el tiempo de almacenamiento. Las inversiones de los centros comerciales para organizar las existencias de materiales y el almacenamiento pueden recorrer un largo camino en términos de ahorro financiero, reduciendo los impactos ambientales, y minimizando el desperdicio.

#### **4.3.2. Técnicas de construcción para reducir los impactos ambientales.**

Las técnicas especiales de construcción de carreteras pueden reducir significativamente los impactos ambientales. El informe anterior de la PIARC "Reducción de la huella de carbono de los pavimentos durante el ciclo de vida" [1], recomienda las siguientes técnicas:

- Para mezclas asfálticas, el uso de rodillos de compactación inteligente (IC) permite una compactación uniforme con el número de pasadas necesarias para una instalación adecuada, lo que resulta en una mejor calidad de construcción lograda con impactos mínimos.
- Para los recubrimientos de hormigón, la técnica de colocación de dos capas que se usa regularmente en Austria ofrece una construcción acelerada y una reducción del uso de materiales vírgenes, ya que los materiales reciclados se incluyen en la capa inferior.
- El uso in situ de plantas de procesamiento por lotes ofrece la ventaja de una reducción sustancial en las distancias de transporte de materiales.

Otras formas de reducir los impactos debidos a la construcción incluye la reducción del consumo de combustible y las emisiones, que se puede lograr a través de las estrategias especificadas anteriormente (reducción del tiempo al ralentí, minimización de las distancias de transporte, uso de combustibles alternativos, etc.).

Se pueden citar como impactos adicionales de la construcción, con consecuencias tanto sociales como ambientales, los retrasos y congestión del tráfico, la producción de ruido y otras emisiones directas al aire y al agua desde el lugar de construcción. La aceleración de la construcción a través del cierre de líneas estratégicas, la gestión del tráfico y los sistemas de alerta inteligentes pueden tener múltiples efectos positivos como la reducción del consumo de combustible, tanto para la agencia como para los usuarios, los costes de los usuarios debidos a la demora del tráfico, la reducción de las emisiones, el ruido y la contaminación, y una mayor seguridad. Sin embargo, las concesiones de la construcción acelerada pueden incluir una calidad de construcción comprometida y un aumento en los costos del proyecto, por lo que se debe tomar precaución para evaluar de manera integral los beneficios de esta estrategia.

#### **4.3.3. Aseguramiento de la calidad de las construcciones.**

Muchos gestores de carreteras experimentan que los fallos y deterioros prematuros del pavimento ocurren con demasiada frecuencia. Las obras pueden cumplir con la duración de la garantía, pero no con la esperanza de vida del pavimento. El enfoque en el coste y el tiempo de finalización a menudo conduce a trabajos de baja calidad y al uso inadecuado de los materiales. Si estas dificultades tempranas pueden evitarse, se puede lograr una reducción sustancial de los costes y ahorros ambientales.

Un país que ha analizado específicamente esto en los últimos años es Noruega [27]. La figura 6 muestra un dibujo del principio del estudio noruego. Si se pueden eliminar los fallos tempranos (el

"bulto" a la izquierda en la figura), se incrementará la vida útil general del pavimento, moviendo toda la curva hacia la derecha, lo que resultará en ahorros considerables, tanto financieros, como en términos de emisiones.

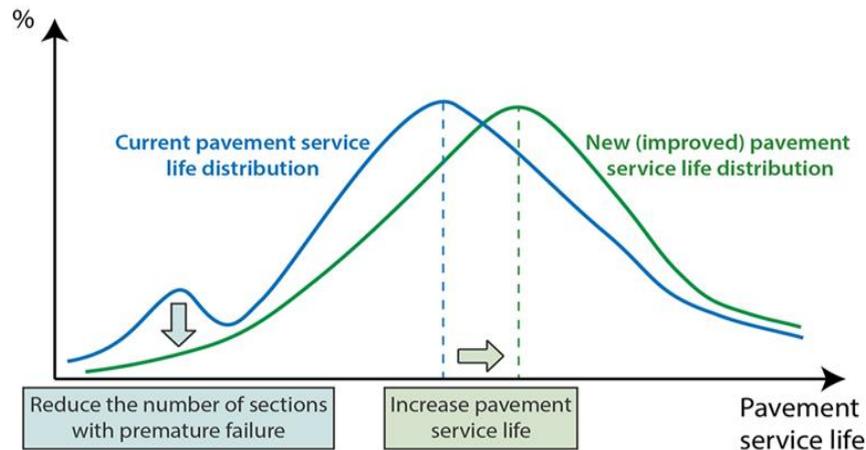


Figura 6: Distribución de la vida del pavimento asfáltico, efectos del corte de fallos tempranos [27]

Las posibles acciones para mejorar la calidad de las obras de construcción pueden dividirse en dos categorías principales;

- *Mejoras técnicas*, incluidos los requisitos más claros y precisos sobre, por ejemplo ejecuciones de juntas, la correcta aplicación del riego de adherencia, la temperatura y control de la superficie por infrarrojos (IR), la compactación inteligente, etc.
- *Mejoras de Competencia*, que implica tanto a los gestores como a los contratistas de carreteras, incluyendo por ejemplo, listas prácticas de comprobación / instrucciones para los inspectores de control de calidad, "mejores prácticas" -Guías con fotos / ilustraciones, competencia / requisitos en los contratos / documentos de licitación, cursos de formación especializados para diferentes funciones / trabajos / deberes etc.

La conclusión que se deduce en la referencia [27] habla de la fuerte necesidad de una mejor experiencia en tecnología y mantenimiento vial. El uso inadecuado de los materiales se ve a menudo, y hay una creciente falta de profesionales. Por lo tanto, el fomento de la competencia en la mano de obra de la construcción, junto con métodos y procedimientos de control de calidad actualizados, contribuirá a la construcción de pavimentos ecológicos y sostenibles.

#### 4.4. FASE DE USO

La fase de uso del pavimento incluye las operaciones regulares y utilización del pavimento. En esta fase, las interacciones entre el pavimento y los vehículos (efectos de la rugosidad, macrotextura, desviaciones en el consumo de combustible del vehículo y las emisiones del tubo de escape), así como las interacciones entre el pavimento y el medio ambiente (es decir, los efectos en el clima urbano, escorrentía de aguas pluviales, ruido, etc.) resultan importantes en consideraciones de sostenibilidad.

##### 4.4.3. Resistencia a la rodadura (RR)

Una contribución considerable a las emisiones relacionadas con las carreteras se debe al uso de combustible por el tráfico. Una técnica que se puede utilizar para reducir la huella de vida útil del pavimento es la reducción de la resistencia a la rodadura (en adelante RR). En física, RR se define

como la fuerza que se opone al movimiento hacia adelante cuando una rueda se está moviendo. Aunque bien modelado en la física, el RR sigue siendo una de las mayores incógnitas de la investigación vial. En los últimos años, se han iniciado varios proyectos internacionales dirigidos a mejorar la comprensión de las condiciones de borde que influyen en la RR.

Uno de estos proyectos fue MIRIAM (Modelos para la resistencia a la rodadura en sistemas de gestión de activos de infraestructura vial) iniciado por doce socios de Europa y los Estados Unidos. Los resultados de este proyecto arrojaron algunas conclusiones básicas sobre la RR y las características de la superficie [29]:

- Los parámetros viales que afectan claramente a la Resistencia a la rodadura RR son: la macrotextura (representada por la profundidad media de perfil o MPD de profundidad media de perfil), la megatextura y las irregularidades (representada por el Índice de rugosidad internacional o IRI).
- Hay indicios de que la rigidez del pavimento es otro factor que debe ser considerado.
- Para la gestión de carreteras, las mediciones directas de RR parecen no ser fiables.
- Hay efectos de microslippage (stick-slip) en la interacción neumático / carretera que requieren consideración también de la microtextura de la superficie de la carretera (fricción seca y húmeda).

Medir la RR in situ es una tarea exigente porque la fuerza RR es muy pequeña en comparación con la carga vertical de los neumáticos. Solo hay unos pocos dispositivos de medición móviles en el mundo, la mayoría de ellos remolques, que cumplen con este desafío. El sistema de la Universidad Técnica de Gdansk (Polonia) se utilizó para medir 64 superficies diferentes en una instalación de prueba del Departamento de Transporte de Minnesota en los Estados Unidos [30] en el que se sometió a pruebas una gran variedad de posibles superficies: mezclas densas / porosas, PCC, superficie fresada, texturizados, ... Para ello, se desarrolló un algoritmo que simulara el consumo de energía de seis automóviles convencionales típicos para el mercado estadounidense, ofreciendo (Table 4) una visión general del coeficiente RR y el consumo de energía simulada de las superficies seleccionadas. Los resultados indican una clara interdependencia de MPD y RR, de forma que las superficies rugosas con un alto MPD, como el tipo poroso, tienen un RR más alto y por lo tanto un consumo de energía simulado también más alto. A velocidades mayores, el cambio simulado es menor a medida que se vuelven más importantes las fuerzas del viento (resistencia del aire).

Es importante enfatizar que la resistencia al deslizamiento es una característica crucial de la superficie de la carretera para los usuarios de la carretera, ya que es un indicador de seguridad y podría haber un posible conflicto con la RR. Normalmente, los valores altos de MPD conducen a buenos valores de resistencia al deslizamiento. Además de la influencia de superficie de la carretera, se debe mencionar que la presión del neumático y el neumático en sí también tienen una fuerte influencia en la RR.

Pavimento de la carretera	Coefficiente de resistencia a la rodadura CRR [-]	Cambio simulado en el consumo de energía a 110 km/h [%]	Cambio simulado en el consumo de energía a 70 km/h [%]
Mezcla densa 12,5 mm Superpave	0,010	0,0 [30]	0,0 [30]
PCC de textura transversal	0,010	0,0	0,0
PCC de árido expuesto	0,011	+ 2,4	+ 3,8
Tratamiento superficial doble	0,011	+ 2,6	+ 4,2
Hormigón poroso	0,011	+ 2,6	+ 4,2
Mezcla bituminosa porosa en caliente	0,012	+ 3,8	+ 6,1

*Tabla 4: Resistencia a la rodadura y cambio simulado en el consumo de energía de diferentes superficies de carreteras en las instalaciones de MnROAD [30].*

#### 4.4.4. La resistencia a la rodadura (RR) y las condiciones del camino

La Universidad de California Davis y Caltrans con la ayuda de los asociados del Proyecto MIRIAM [31], realizaron un análisis del ciclo de vida centrado en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, se fijaron cuatro opciones diferentes de mantenimiento vial relacionadas a varios escenarios de tráfico y de vehículos para evaluar los efectos de las condiciones de la carretera en el consumo de combustible.

Se consideraron los siguientes escenarios de mantenimiento de carreteras [32] :

- “No hacer nada”, en cuyo caso la carretera se deteriora lentamente a partir de un IRI inicial predefinido de 2,5 a 3,9 m/km (según la sección y el carril analizados de la carretera) y una macrotextura predefinida.
- "Rehabilitación suave", en cuyo caso, se restableció en el mantenimiento la textura lisa media después de la construcción menos dos desviaciones estándar.
- “Rehabilitación media suave”, en cuyo caso la textura lisa media después de la construcción se restauró al momento del mantenimiento.
- "Rehabilitación menos suave", en cuyo caso la textura lisa media después de la construcción más dos desviaciones estándar se restableció en el mantenimiento.

Los escenarios de tráfico y flota de vehículos se definieron de la siguiente manera:

- No aumenta el tráfico ni mejora la economía de combustible de la flota de vehículos.
- Sin aumento de tráfico y mejora de la economía de combustible de la flota de vehículos.
- Crecimiento del tráfico del 3 por ciento y no mejora la economía de combustible de la flota de vehículos.
- Crecimiento del tráfico del 3 por ciento y mejora de la economía de combustible de la flota de vehículos.

El modelo se aplicó a dos tramos viales en el condado de Los Ángeles (superficie PCC) y el condado de Kern (superficie HMA). El tráfico diario promedio en la Sección del Condado de Los Ángeles fue de 84,000 veh/día, mientras que en la Sección del Condado de Kern fue de 34,000 veh/día.

Los resultados del estudio mostraron que para una HMA (5 años período), una mejora en la textura lisa de la carretera reduce el consumo total de energía alrededor del 6 % y la mejora en la economía de combustible tiene aproximadamente el mismo efecto. Las diferencias para el escenario de mantenimiento "suave" y "menos suave" fueron pequeñas. Sin embargo, para un PCC (período de 10 años), el ahorro de combustible de los vehículos brinda un beneficio más significativo (alrededor del 5 %) que las reducidas en la RR o un mejor mantenimiento de las carreteras (sobre el 3 %).

#### 4.4.5. Las emisiones de ruido

Las emisiones de ruido del tráfico se deben principalmente a una combinación de dos fuentes principales: el ruido del motor y la transmisión secundaria, y el de rodadura o rozamiento neumático-pavimento. ¿Cuál de las dos fuentes es dominante y va a depender de la velocidad del vehículo y de la clase de vehículos (coches de pasajeros, camiones, motocicletas)?: para turismos que lleven velocidades constantes de más de 30 km/h, el ruido de rodadura o rozamiento neumático-pavimento es normalmente dominante, mientras que este umbral sube a 50 - 60 km/h en el caso de los camiones. Sin embargo, el umbral dependerá de las características del vehículo y del tipo de pavimento.

El ruido de rodadura neumático-pavimento es causado por dos principales mecanismos:

- Las oscilaciones mecánicas del neumático causadas por el movimiento de rodadura interactúan con la masa de aire circundante y se irradian como ruido.
- El aire entre el neumático y el pavimento se comprime y descomprime en la zona de contacto por el movimiento de balanceo. Estas oscilaciones aerodinámicas se conocen como el efecto de bombeo de aire.

Otros mecanismos, como el efecto de cuerno de la llanta y la superficie del pavimento, también contribuyen al ruido.

En cuanto a las propiedades acústicas las rodaduras del pavimento se pueden clasificar en base a su contenido de aire, forma de la superficie, y el espectro de textura. La textura o superficie tiene una gran influencia en la formación de las oscilaciones de los neumáticos que contribuyen en la irradiación interna y externa del sonido. Las formas con superficie cóncava son ventajosas para la reducción de ruido ("mesetas con valles").

El contenido de vacío de aire de la capa influye en la presencia de efectos de bombeo del aire y en la emisión de las ondas de este tipo en el medio ambiente, ya que las superficies porosas pueden absorber las ondas de sonido, aunque se debe destacar que el efecto reductor de ruido del asfalto poroso (en adelante AP) depende de la limpieza del pavimento y del desgaste del pavimento. Las nuevas capas de AP tienen un mayor potencial para reducir significativamente el ruido del tráfico, pero este efecto se reduce cuando comienza la obstrucción de los huecos. Las superposiciones con hormigón permeable también ofrecen la ventaja de la reducción de ruido, además de una mayor seguridad y reducción de salpicaduras y rociado, como se demostró en la instalación de pruebas de vías de bajo tráfico del proyecto Minnesota Road Research [33].

Los pavimentos de PCC tienen la ventaja de que la superficie se puede texturizar durante o después de la construcción al realizar superficies con áridos expuestos, texturizar con una escoba o realizar

un fresado con disco de diamante. La última opción de texturización consiste en eliminar una pequeña parte de la superficie y producir surcos longitudinales en la superficie del pavimento de PCC utilizando discos de diamante dispuestos en un tambor de forma muy próxima, con el objetivo principal de mejorar la resistencia al deslizamiento. En los últimos años, sin embargo, el potencial de reducción de ruido provocado por el esmerilado con diamante ha focalizado su atención pues ciertas actividades de investigación recientes en Alemania han demostrado una reducción potencial del ruido de hasta 3 dB (A) en comparación con la superficie de referencia [34], que corresponde al nivel de superficies de hormigón de áridos expuestos. Además se han realizado investigaciones en el EEUU combinando el fresado y el ranurado [35]. El diseño final de la textura con respecto a la separación óptima de los discos y los anchos de los huecos está actualmente bajo investigación.

#### **4.5. MANTENIMIENTO**

El ciclo de mantenimiento de una carretera, desde su construcción hasta su rehabilitación o reconstrucción, requiere una cuidadosa evaluación de su sostenibilidad. La Tabla 5 muestra algunas de las mejores prácticas, así como los desafíos y riesgos asociados. La alta calidad del nuevo pavimento logrado mediante el uso de materiales de construcción de alta calidad y una construcción sin defectos puede extender el período de mantenimiento hasta que se necesite la primera actividad, por lo que la durabilidad esperada es un factor decisivo que influye tanto en la ingeniería como en el desempeño ambiental de la técnica de mantenimiento (Tabla 6).

Al tomar decisiones sobre el mantenimiento, se debe considerar la calidad, la rentabilidad, la ingeniería y el desempeño ambiental, a la vez que también se aplican al mantenimiento los aspectos de sostenibilidad en la selección de materiales y procesos de construcción en construcción de obras nuevas.

Criterios	Mejores prácticas	Incertidumbres / retos / riesgos
Coste total del mantenimiento	<p>Selección de un pavimento con bajos requerimientos de mantenimiento.</p> <p>Mejora del diseño de la mezcla para maximizar las prestaciones.</p> <p>El control de calidad (en adelante QC) del proceso de construcción .</p>	<p>Operaciones de mantenimiento inesperadas debido a accidentes, clima extremo o deterioro prematuro.</p> <p>Los requisitos especiales (por ejemplo, pavimentos de bajo ruido) podrían tener un coste de mantenimiento más alto.</p>
Tipo de técnica de mantenimiento.	<p>Planificación de actividades.</p> <p>Para la rehabilitación, se debe considerar el reciclado in situ.</p> <p>El mantenimiento preventivo podría ser una opción, por ejemplo, el sellado preventivo por penetración de la superficie.</p> <p>Evaluación precisa de datos ambientales.</p>	<p>La durabilidad de las tecnologías disponibles difiere (ver Tabla 6).</p> <p>Disponibilidad de tecnología y productos de construcción.</p> <p>No todos los tipos son técnicamente factibles.</p> <p>Disponibilidad de datos.</p>
Aspectos del reciclado	<p>Uso de materiales que permitan su reciclaje.</p> <p>Selección de un proceso de molienda que garantice el máximo porcentaje de reutilización. Para garantizar la máxima calidad de reciclaje, las capas se deben fresar una por una.</p>	<p>Componentes que impiden el reciclado por ejemplo, los aditivos desconocidos.</p> <p>Restricciones de tiempo.</p> <p>No es posible el reciclado de alta calidad, por ejemplo, el RAP no se utiliza en la misma capa que el fresado.</p>

*Tabla 5: Mejores prácticas e incertidumbres / desafíos / riesgos en el mantenimiento de carreteras*

Tipo de técnicas de mantenimiento.	Durabilidad estimada [años]	
	Tráfico pesado de medio a alto	Tráfico pesado de bajo a medio
Riego monocapa	-	8
Tratamiento superficial sobre con engravillado	-	9
Pre- engravillado	-	8
Lechadas / microaglomerado en frio	5	8
Capa ultrafina de mezcla bituminosa	-	10
Capa ultrafina de Mezcla bituminosa tipo SMA	8	10
Capa ultrafina de mastic bituminoso	10	12
Reperfilado / Remezclado / Termoregeneración	8	10
Reemplazo de la capa superficial de mezcla bituminosa	12	18
Reemplazo de la capa superficial de mezcla bituminosa tipo SMA	16	22
Reemplazo de la superficie de mastic bituminoso	19	26

*Tabla 6: Durabilidad estimada de diferentes tipos de técnicas de mantenimiento según [36].*

Cabe señalar que la durabilidad de las nuevas tecnologías, que parecen ofrecer ventajas para el medio ambiente y la conservación de los recursos, a menudo no está demostrada. Se pueden añadir algunos problemas, como las dificultades del reciclado, pero bajo los aspectos de sostenibilidad, las condiciones de contorno de una obra de construcción pueden influir en la selección de una técnica de mantenimiento. Por ejemplo, se deben considerar las distancias de transporte hasta la planta de mezcla de cualquier RAP. Otros criterios de sostenibilidad también pueden verse influenciados por la elección de la técnica, como se resume en la Tabla 7.

Técnica de mantenimiento	Uso de energía	Intensidad de transporte	Uso de nuevos materiales	Durabilidad
Tratamiento superficial	↓	↓	→	↓
Lechada / microaglomerado en frío	→	→	→	→
Capa ultrafina de mezcla bituminosa (en caliente)	↗	↗	→	↗
Reemplazo de mezcla bituminosa (en caliente)	↑	↑	↗ to ↑ (% RAP usado)	↑
Reperfilado / Remezclado / Termoregeneración	↑	↓	↘	→

↑ tendencia alta

↓ tendencia baja

*Tabla 7: influencia tendencial de diferentes técnicas de mantenimiento en importantes criterios de sostenibilidad.*

#### 4.6. FIN DE LA VIDA

Las técnicas de pensamiento de ciclo son más adecuadas para economías lineales que tienen una vida útil definida (incluidas las fases de extracción de materias primas, fabricación de materiales, construcción, conservación y eliminación de materiales). Los pavimentos son sistemas reparables con una vida útil indefinida, por lo que no tienen un punto final bien definido. Las decisiones sobre cuándo reparar (rehabilitar) o reemplazar (reconstruir) una sección de pavimento es a menudo una decisión económica. No obstante, el fin de vida útil (EOL) del pavimento se define como la “disposición final y la posterior reutilización, procesamiento o reciclaje de cualquier parte del sistema pavimento que haya alcanzado el final de su vida útil” [4].

Cuando un pavimento llega al final de su vida útil, existen varias opciones de reciclaje, tanto para pavimentos de hormigón como de asfalto, con el fin de evitar su eliminación en un vertedero. Para evaluar los indicadores de sostenibilidad de cada opción, se debe considerar el ciclo de vida completo. Los costos económicos y ambientales para las diversas estrategias difieren según el tipo de técnica de reciclaje, las distancias de transporte, la calidad y la aplicación del material de pavimento reciclado. Las siguientes secciones destacan los impactos de estos factores en los beneficios y las compensaciones de las estrategias EOL para pavimentos de hormigón y asfalto.

##### 4.6.1. Estrategias de fin de vida útil (EOL) para pavimentos mezcla bituminosa.

Las estrategias de reciclado para los pavimentos de mezcla bituminosa están bien desarrolladas y se practican en todo el mundo. El reciclaje de los pavimentos de mezcla bituminosa se puede hacer en el lugar utilizando una técnica de reciclado o fuera del sitio en una planta central. Cada estrategia

tiene ventajas y desventajas, pero, sin embargo, la elección de un método u otro de reciclado debe basarse principalmente por los tipos de deterioros presentes en el pavimento existente.

#### **4.6.1.1. Reciclaje en la planta o central.**

El Reciclaje en la Planta o Central (en adelante RCP) es un procedimiento en el cual el material de pavimento asfáltico recuperado (RAP) se combina con áridos vírgenes, ligante virgen y agentes de reciclado en la planta de mezcla bituminosa para producir una nueva mezcla asfáltica. El pavimento se muele o se rompe, se tritura y se transporta a una planta productora de mezcla asfáltica, donde se tamiza y se almacena en pilas separadas por tamaño y fuente. La mejor práctica es separar el RAP en al menos dos grupos diferentes para aumentar la uniformidad del producto, lo que incrementa la calidad del pavimento asfáltico que utiliza el RAP. Además, una buena práctica es cubrir los acopios para reducir el contenido de humedad y evitar la contaminación, que puede ir desde la lixiviación hasta la escorrentía de aguas pluviales.

El ligante bituminoso en el RAP está oxidado y, por lo tanto, es más rígido que el ligante virgen. Para ablandar el ligante en RAP, existen dos técnicas de reciclaje en planta o central: reciclaje de plantas en caliente (en adelante HCPR) y reciclaje de plantas en frío (CCPR). En HCPR, como su nombre lo indica, el RAP se calienta y se ablanda, mientras que en el CCPR se agrega un agente de asfalto / reciclaje emulsionado para ablandar el RAP.

En el HCPR, el árido virgen se sobrecalienta antes de agregar el RAP al tambor. El RAP se calienta indirectamente por los áridos vírgenes cuando se introduce en el tambor, aunque si este tiene un contenido alto de humedad puede obstaculizar significativamente la producción de la planta, ya que el calor convertirá la humedad en vapor en lugar de suavizar el RAP. Por lo tanto, es importante acopiar todas las reservas de RAP de manera que el contenido de humedad se mantenga en un mínimo práctico. El sobrecalentamiento de los áridos vírgenes puede resultar en un uso adicional de combustible y energía, que puede compensar los beneficios económicos y ambientales del uso de RAP.

El reciclaje de plantas centrales en frío (CCPR) combina RAP con asfalto emulsionado / agente de reciclaje y se agregan nuevos áridos sin el tratamiento térmico. Aunque no es una práctica común [37, 38], se han realizado mejoras significativas a las especificaciones, la ingeniería, los equipos de construcción, y los métodos de ensayo [39] desde los años 2000, mejorando la fiabilidad de las prestaciones de mezclas de reciclado en frío utilizados en superficie, base o capas de subbase. Dependiendo del agente de reciclaje utilizado, se pueden incurrir en impactos ambientales y costos adicionales. Al-Qadi, Elseifi y Carpenter (2007) proporcionan una revisión exhaustiva del uso de RAP en el reciclaje de planta [40].

#### **4.6.1.2. Reciclaje in situ**

El reciclaje in situ es un método que se realiza en el sitio con el material RAP obtenido del pavimento existente deteriorado. La principal ventaja de las técnicas de reciclaje in situ es la reducción o incluso la eliminación del transporte de material. Similar a lo comentado del RCP, hay dos técnicas para ablandar el ligante; usar calor, llamado reciclado in situ en caliente (en adelante HIR) o usar agentes de reciclaje llamado reciclaje in situ en frío (en adelante CIR). HIR consiste en calentar el pavimento de asfalto deteriorado hasta que se ablande lo suficiente como para ser escarificado o mezclado con un nuevo material adicional o un agente de reciclaje, mientras que el CIR consiste en la pulverización del pavimento existente, reduciendo el tamaño del RAP, la adición del agente de

reciclaje y la colocación y compactación de la mezcla reciclada. Ambas técnicas utilizan un tren de equipamiento especializado.

El reciclaje in situ es aplicable a situaciones específicas. Para HIR, el aligante existente debe tener un contenido de huecos suficientemente alto, los deterioros limitarse a la superficie, y el pavimento no debe tener problemas de delaminación, formación de roderas (ahuellamiento) de más de 5 mm de profundidad, áreas fuertemente bacheadas o zonas selladas superficialmente. El CIR es un tratamiento más profundo, por lo general entre 75 y 100 mm de profundidad, y por lo tanto puede ofrecer mejoras estructurales significativas en el pavimento, aunque es importante que el este tenga una base o subbase estructuralmente sólida y bien drenada, y no se forme roderas debido al exceso de asfalto en la mezcla. En la referencia [41] se puede encontrar cierta orientación sobre cuándo aplicar el CIR.

#### **4.6.1.3. Reciclado del material bituminoso: Full depth reclamation (en adelante FDR)**

La FDR también es una técnica que se realiza in situ en el que todo el espesor del pavimento bituminoso deteriorado existente y una porción predeterminada de los materiales subyacentes (base, subbase y subrasante) se pulverizan y mezclan uniformemente para proporcionar un material homogéneo. El material pulverizado se puede mezclar con ligantes, conglomerantes, aditivos o agua adicionales, y se coloca, clasifica y compacta para proporcionar una capa base mejorada antes del extendido de las capas superficiales finales. El FDR se puede usar para reciclar profundidades de pavimento de hasta 300 mm, siendo más comunes las profundidades de 15 a 230 mm [41, 42]. Para los pavimentos muy dañados, la estabilización con cemento puede resultar una solución, resultando más apropiado el reciclado de las capas bituminosas para el caso de daños menores [43, 44, 45]. Por lo tanto, el FDR se distingue de otras técnicas de rehabilitación comúnmente utilizadas, como CIR y HIR, por su capacidad para reciclar capas de pavimento más gruesas y para abordar problemas específicos enraizados en diferentes capas.

#### **4.6.2. Estrategias de fin de vida útil para pavimentos de hormigón.**

Varias opciones de EOL están disponibles para pavimentos de hormigón: reutilización usando diferentes tipos de técnicas de losa fracturada y reciclado. La selección de la técnica óptima es específica para el contexto y depende de múltiples factores, principalmente de las condiciones del pavimento.

##### **4.6.2.1. Técnicas de losa fracturada.**

Varias estrategias de reutilización basadas en el uso del pavimento de hormigón como base o subbase para un revestimiento o pavimento nuevo sin procesamiento sustancial son posibles en el EOL. Los ejemplos de estas técnicas son: fisurar y asentar, romper y asentar y rublización. La primera solo se puede aplicar en pavimentos no reforzados con el objetivo principal de generar grietas estrechamente separadas y espaciadas a lo largo de la capa de hormigón, de modo que la futura transferencia de carga se logre principalmente a través del rozamiento del árido. La segunda es la técnica correspondiente que se realiza en pavimentos reforzados, sin embargo, en este caso, el hormigón y el refuerzo están fracturados. La rublización de los pavimentos de hormigón es un proceso en el cual las losas de pavimento de hormigón se rompen in situ por maquinaria pesada y se pueden reutilizar en una base útil para el futuro pavimento. El pavimento de hormigón se rompe en piezas lo suficientemente pequeñas como para minimizar el potencial de agrietamiento por reflexión, pudiéndose usar fibras, membranas o/y materiales de la capa intermedia para mitigar el

agrietamiento por reflexión. La aplicabilidad de diferentes técnicas depende de las condiciones generales del pavimento de hormigón; los pavimentos con calidad inapropiada (p. ej., con deterioros severos en las juntas) pueden no resultar adecuados para la reposición sin un tratamiento in situ, como la rublización. Los pavimentos con deterioro severo son más adecuados para el reciclado aunque, tanto desde el punto de vista económico y ambiental, la reutilización es la alternativa más beneficiosa debido al relativamente corto periodo de construcción, y el uso mínimo de materiales, energía y recursos financieros.

#### **4.6.2.2. Reciclado**

En los últimos años, la escasez de áridos naturales de alta calidad se está convirtiendo en un problema prominente en la industria de la construcción, porque los costes y distancias de transporte de los áridos naturales están aumentando. El árido de hormigón reciclado (en adelante RCA) producido en el proceso de reciclaje del pavimento de hormigón está, por lo tanto, emergiendo como una alternativa económicamente efectiva y ecológica. El reciclaje del pavimento de hormigón es un proceso de rotura, remoción y refinamiento mecánico del pavimento existente en un material granular. El reciclaje se puede realizar in situ o fuera. El procesamiento in situ se caracteriza por reducciones en el consumo de combustible, las emisiones, los costes de la mano de obra y las menores distancias de acarreo. El RCA se puede usar en nuevas mezclas de hormigón o asfalto, o como un material para capas de subsuelo, pues la aplicabilidad del reciclaje depende de la condición del pavimento de hormigón. El RCA de alta variabilidad o el de la estructura con daños importantes en el material (por ejemplo, daños por congelación / descongelación o reacción de áridos alcalinos) generalmente no se usa en hormigón nuevo, sino más bien como base o material de subbase. La referencia sobre el uso de RCA como un árido de pavimento de hormigón se puede encontrar en la referencia [46].

La implementación del reciclado siempre resulta beneficiosa en términos económicos. Como los costes principales de la infraestructura son los costes de los áridos, el uso de RCA puede producir ahorros considerables. En términos de beneficios ambientales, la implementación de RCA reduce las emisiones y el agotamiento de los recursos asociados con la extracción de áridos vírgenes y acorta las distancias de acarreo agregadas. Cabe destacar que RCA tiene diferentes propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad en comparación con los áridos naturales, que deben considerarse en el diseño.

#### **4.6.3. Eliminación**

La eliminación abarca la demolición del pavimento, la remoción y el transporte del material de vertedero. Aparentemente, esta estrategia es costosa y produce emisiones y, por lo tanto, es el escenario menos preferible. Si es posible, las otras estrategias de EOL deben considerarse antes de decidir sobre la demolición y disposición del pavimento. Gracias a los altos costos de los vertederos en Europa, que a veces exceden los costos de reciclaje, se recicla hasta el 90 % de los residuos de construcción [47] mientras que en los Estados Unidos, los vertederos también son cada vez más costosos [48]; por tanto, se incentiva a los profesionales a utilizar alternativas a la eliminación.

#### **4.6.4. Consideraciones económicas y ambientales.**

El uso de materiales del pavimento al final de su vida útil se acepta como una de las formas más efectivas de mejorar la sostenibilidad del mismo. La conservación de materiales vírgenes, la reducción en el costo de mantenimiento del pavimento y su rehabilitación, los cierres de carriles

reducidos, la reducción en el consumo de combustible y las emisiones asociadas son varios de los beneficios potenciales que las técnicas de reciclado incluyen. Pero es importante tener en cuenta que estos son beneficios potenciales y que su realización específica para el contexto, depende del proyecto y la ubicación del material, los defectos existentes en el pavimento y la técnica de reciclado. Un factor bien conocido que afecta los beneficios del uso de materiales reciclados es el coste del transporte del material en comparación con el costo del material virgen nuevo entregado en el sitio de construcción [49]. Para evaluar los beneficios y las compensaciones, se deben considerar todos los impactos sobre el ciclo de vida completo del pavimento. Un análisis económico y ambiental integral de si se debe reciclar y reutilizar los materiales del pavimento para cuantificar completamente los efectos de las opciones de EOL.

## 5. ACTIVIDADES DE ESTANDARIZACIÓN

### 5.1. ESTADO DEL ARTE

Los intereses en la evaluación de los impactos de la producción de bienes y servicios, como el uso de recursos, la generación de residuos y las emisiones, han aumentado notablemente en las últimas décadas. La energía y la eficiencia de los recursos de la construcción y el mantenimiento de carreteras es ahora un objetivo importante de política en muchos países. Una metodología específica y generalmente aceptada para el cálculo de los impactos ambientales, que incluye más que las emisiones directas, se conoce como evaluación del ciclo de vida (en adelante ACV=LCA). Este análisis representa una metodología integral para cuantificar la huella ambiental a lo largo del ciclo de vida, estandarizada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en dos documentos principales: ISO 14040 [48] e ISO 14044 [49] (ISO 14000 es un conjunto de estándares que ayudan a las empresas a minimizar los impactos ambientales negativos del aire, agua o de la contaminación del suelo). El software y las bases de datos especializados en LCA se han desarrollado en consecuencia para facilitar la evaluación del producto / servicio desde una perspectiva de la cadena de valor, desde la extracción de las materias primas, a través de la fase de producción y el uso de la fase final EOL. Además, han ganado popularidad la producción de diferentes eco-etiquetas que informan del desempeño ambiental de diversos productos, colaborando en una mayor transparencia, permitiendo comparaciones significativas entre los productos, fomentando la innovación y proporcionando cierta base para la mejora de la eficiencia productiva.

Una *declaración ambiental de producto* (en adelante EPD) es un documento conciso que resume estandarizado y de manera objetiva, el perfil ambiental de un determinado producto. Una EPD se basa en el análisis del LCA realizado según ISO 14040 [50] e ISO 14044 [51]. Los principios y procedimientos para el desarrollo de declaraciones ambientales se describen en ISO 14025 [52]. Basado en el estándar, EPD es una etiqueta ambiental tipo III.

La EPD deberá, entre otras cosas, dar información sobre:

- Recursos utilizados (materias primas, energía)
- Emisiones (en el aire, el agua, y suelo)
- Posibles sustancias peligrosas
- Residuos / Tratamiento de fin de vida y reciclaje.

Todos los productores /fabricantes deben declarar el contenido de los materiales con posible influencia ambiental en sus productos. El objetivo principal es que el cliente pueda comparar productos /soluciones alternativas en función de sus perfiles ambientales y ejercer su juicio y opciones en función de esa declaración.

Las EPDs para el mismo producto pueden ser declaradas por diferentes productores, por lo que deben prepararse sobre la misma base técnica y con tecnología común. Por lo tanto, antes de desarrollar una EPD, se establecen un conjunto de reglas de categoría de producto (PCR) para definir el marco (límites) de los cálculos y otros requisitos del análisis LCA. Las PCR dan directrices para la preparación de EPD para parte o la totalidad del ciclo de vida ("cuna a puerta", "cuna a tumba" u otros). El resultado de los cálculos puede dar la cantidad acumulada de efecto invernadero, gases y/u otros impactos ambientales (acidificación, reducción de ozono, toxicidad).

El ACV se usa a menudo para encontrar el uso "más respetuoso con el medio ambiente" de los materiales. El desafío es definir los límites /marco del sistema de tal manera que diferentes

materiales y/o productos se definan de la misma manera y se puedan comparar objetivamente, es decir, la necesidad de estandarizar el marco para estos cálculos se ha hecho evidente. Además de las normas ISO mencionadas anteriormente que respaldan los esfuerzos de LCA en todo el mundo, diferentes países han emprendido esfuerzos para desarrollar sus propios programas de sostenibilidad.

### 5.1.3. Experiencia de Australia

El Consejo de Sustentabilidad de Infraestructura de Australia (ISCA) es un organismo sin fines de lucro basado en miembros que opera en Australia y Nueva Zelanda con el propósito de permitir resultados de sostenibilidad en infraestructura. El ISCA ha desarrollado un valor de evaluación de la Sostenibilidad de la infraestructura (IS) para la planificación, el diseño, la construcción y las operaciones de activos de infraestructura.

- El esquema de calificación IS tiene como objetivo:
- Proporcionar un idioma nacional común para la sostenibilidad de la infraestructura.
- Proporcionar un marco para la aplicación y evaluación consistente de la sostenibilidad en los procesos de licitación.
- Ayuda a evaluar los riesgos de sostenibilidad de toda la vida para proyectos y activos, permitiendo soluciones más inteligentes que reducen los riesgos y los costes.
- Fomentar la eficiencia y la reducción de residuos, reduciendo costes.
- Fomentar la innovación y la mejora continua en los resultados de sostenibilidad de la infraestructura.
- Construir una organización de credenciales y reputación en su aproximación a los resultados de sostenibilidad.

El proceso de calificación es realizado por profesionales capacitados y acreditados, y termina en una calificación /IS Ratio basada en aspectos de sostenibilidad, como se muestra en la Tabla 8 . Más detalles se pueden encontrar en la página web de ISCA <https://www.isca.org.au/>.

	Categoría	Visión general
<b>Gestión</b>	Contexto	La categoría de contexto establece la escena. Incluye áreas temáticas de diseño urbano y paisajístico, así como también se centra en cómo el proyecto de infraestructura ha sido considerado como parte de su entorno, su propósito y cómo mejora la habitabilidad.
	Gestión de liderazgo	Esta categoría incentiva a los proyectos a alinear su estrategia / política / programa de sostenibilidad con los Objetivos de Desarrollo de la Sostenibilidad, evalúa el proceso de riesgos y oportunidades para el proyecto y premia el intercambio de información y conocimientos.
	Obtención sostenible	La categoría de compras sostenibles incluye riesgos y oportunidades sociales y ambientales dentro de las cadenas de suministro, así como también recompensa los resultados sociales, como la participación de empresas sociales. La categoría ha sido desarrollada para alinearse con ISO20400.
	Resiliencia	La resiliencia es algo más que la adaptación al cambio climático. Esta categoría promueve la definición más amplia de resiliencia y analiza cómo la infraestructura contribuye a la resiliencia de la ciudad, la región y la comunidad.
	Innovación	La categoría innovación premia las iniciativas pioneras en diseño, proceso o promoción sostenibles.
<b>Económico</b>	Evaluación de Opciones y de Negocio	La categoría de evaluación de opciones y negocio premia la selección de iniciativas sostenibles utilizando elementos no financieros en la toma de decisiones.
	Beneficios	La categoría de beneficios fomenta los proyectos a realizar un seguimiento de los costes y los beneficios descritos en el caso de negocio y los compara con los resultados reales durante toda la vida de un proyecto.
<b>Medio Ambiente</b>	Energía y carbon	La categoría de energía y carbono premia una reducción de energía y emisiones.
	Infraestructura ecológica	Esta nueva categoría premia la inclusión de infraestructura ecológica, como el diseño urbano sensible al agua, las paredes sostenibles, los techos verdes y todas las demás soluciones de vivienda.
	Impactos ambientales	Esta categoría aborda las descargas de agua, el ruido, la vibración, la calidad del aire y la contaminación lumínica.
	Eficiencia de recursos	La categoría de eficiencia de recursos adopta un enfoque de economía circular para la administración de los recursos y piensa en los recursos de manera integral, desde la reutilización in situ hasta la búsqueda de nuevos e innovadores usos para los productos de "desecho".
	Agua	La categoría agua premia la eficiencia del agua, además de considerar y utilizar las fuentes de agua adecuadas.
	Ecología	La categoría ecología premia el mantenimiento o mejora del valor ecológico.
<b>Social</b>	Participación de los interesados	La categoría de participación de los interesados premia el compromiso efectivo de las partes interesadas.
	Legado	La categoría de legado recompensará los proyectos que dejen un legado positivo para la comunidad y/o el entorno.
	Patrimonio	La categoría patrimonio premia la gestión de seguimiento del patrimonio europeo e indígena.
	Sostenibilidad de la fuerza laboral	La categoría de sostenibilidad de la fuerza laboral incluye educación y capacitación; bienestar; diversidad e inclusión; cultura del lugar de trabajo; planifica la fuerza laboral y alienta a los proyectos a pensar en las habilidades que necesitan para el futuro.

Tabla 8: Aspectos de la sostenibilidad considerados en la calificación IS (v2.0).

#### 5.1.4. Experiencia en Europa

La construcción y mantenimiento de carreteras de manera eficiente en términos de la energía y los recursos, es un importante objetivo político en Europa. El “Plan de acción de la Unión Europea para la economía circular” ha establecido un ambicioso programa, con medidas que abarcan todo el ciclo de vida, desde la producción y el consumo hasta la gestión de residuos y el reciclaje. El Grupo Asesor Europeo de Investigación en Transporte por Carretera (ERTRA G) definió el siguiente objetivo: "hacia un sistema de transporte por carretera 50 % más eficiente para 2030".

Se han ejecutado múltiples proyectos de investigación realizados por diferentes organismos / consorcios europeos en los últimos años en este campo (por ejemplo, el 7º Programa Marco de la UE, las acciones COST, las convocatorias CEDR, etc.), que han formado la base para el desarrollo del documento de referencia CWA (Acuerdo de Taller CEN) [53] cuyo objetivo es apoyar a las autoridades nacionales de la carretera, los operadores privados, contratistas, y las empresas de ingeniería cuando están considerando la sostenibilidad de las carreteras en su día a día del negocio. El documento proporciona un conjunto común, recomendado los indicadores de prestaciones de sostenibilidad (SPI) que se pueden utilizar para la evaluación de la sostenibilidad de las estructuras viales (futuras o existentes). Estos indicadores incluyen definiciones, unidades y medidas y/o métodos de cálculo y están formulados para cubrir los tres pilares de la sostenibilidad, la rama ambiental, el pilar económico y el social, como se muestra en la Tabla 9.

Pilar de sostenibilidad	SPI	
Medio Ambiental	1	Consumo de materiales primarios
	2	Materiales secundarios utilizados.
	3	Materiales o componentes para ser reutilizados, reciclados y energía exportada.
	4	Energía usada
	5	Residuos
	6	Potencial de calentamiento global (GWP)
	7	Potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP)
	8	Potencial de agotamiento del ozono (ODP)
	9	Potencial de acidificación (AP)
	10	Potencial de eutrofización (EP)
	11	Potencial de agotamiento abiótico para recursos no fósiles (elementos ADP)
	12	Potencial de agotamiento abiótico de los recursos fósiles (ADP-combustibles fósiles)
	13	Potencial de toxicidad humana (HTP)
	14	Potencial de eco-toxicidad (ETP)
Económico	15	Coste de vida total: Coste inicial Coste de mantenimiento Coste de fin de vida Valor del activo residual
Social	16	Índice de confort
	17	Auditorías de seguridad e inspecciones de seguridad.
	18	Adaptación al cambio climático.
	19	Ruido neumático - pavimento
	20	Abastecimiento responsable
	21	Congestión de tráfico por actividades de mantenimiento.

Tabla 9: Indicadores de desempeño de sostenibilidad para estructuras viales [51]

**5.1.2.1. PCR de la Asociación Europea de Pavimento de Asfalto**

EAPA (Asociación Europea de Pavimentos de Asfalto) ha desarrollado directrices para las reglas de categorías de productos (en adelante PCR's) destinadas a ayudar a las empresas europeas a preparar las EPD para mezclas bituminosas. La figura 7 muestra el marco para estas PCR. El PCR de EAPA cubre las etapas del producto A1-A3, proporcionando la base para comparar los impactos ambientales de la producción de mezclas bituminosas ("desde la cuna hasta la puerta", donde la "puerta" se define como el punto en el que se encuentra la mezcla bituminosa transferida desde el silo de una planta bituminosa al camión para su transporte al consumidor). Para obtener más detalles sobre los diferentes procesos y lo que se incluye en las fases A1-A3 en EAPA's PCR, consulte el "Documento de orientación para preparar Reglas de Categoría de Producto (PCR) y Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) para mezclas de asfalto" [54].

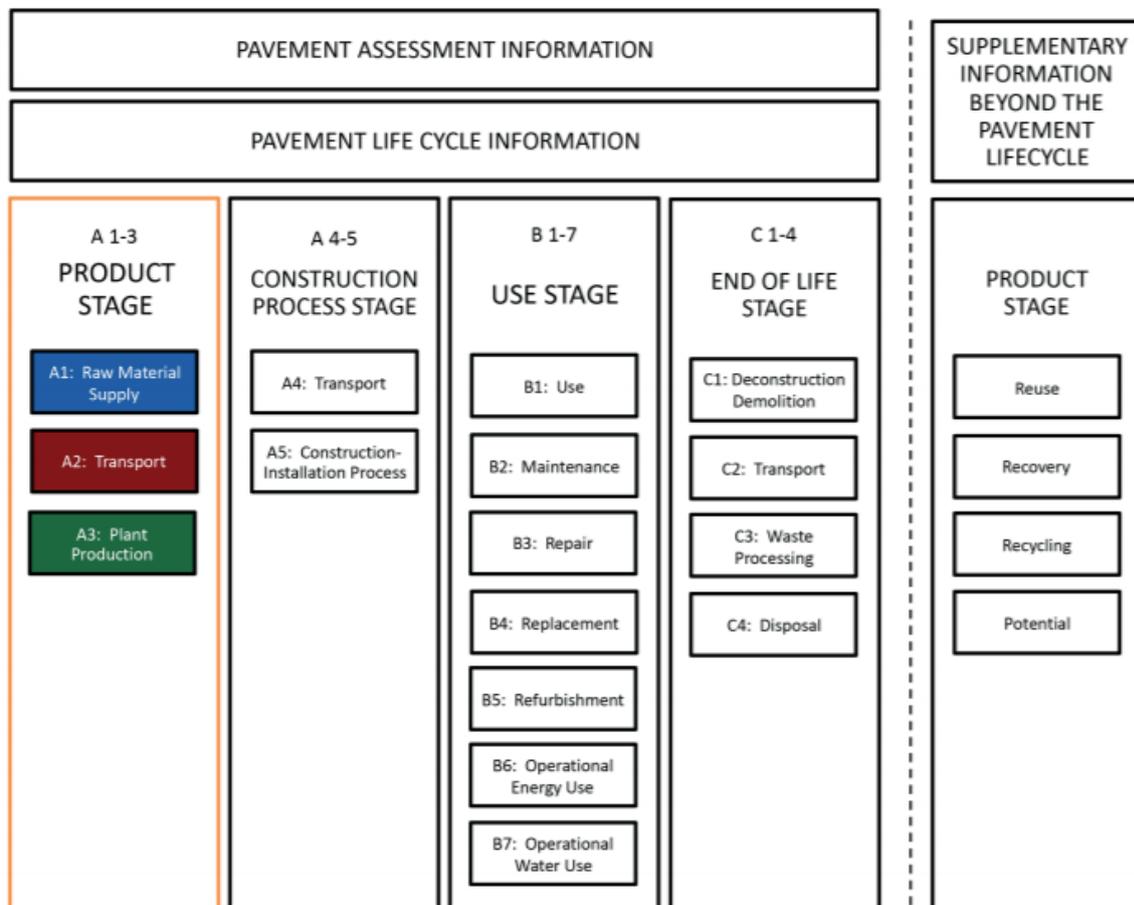


Figura 7: Designaciones de la información modular utilizada para las evaluaciones del ciclo de vida de los pavimentos. Los límites para la guía de EAPA del PCR y EPD se describen en el recuadro de la izquierda, cubriendo la etapa del producto con las fases A1 a A3.

**5.1.4.1. Experiencia en Noruega**

Aunque muchos procesos alrededor de la producción de los pavimentos bituminosos son generales y universales, algunos aspectos son específicos en diferentes países y estados. Para incluir las condiciones locales/nacionales en los cálculos de la EPD, muchos países han desarrollado o empezado a desarrollar sus propios PCR. Como ejemplo, Noruega ha desarrollado un conjunto de

reglas de categoría de productos noruegos (NPCR), que se muestran en la Figura 8. La Parte A contiene los requisitos que son comunes para todos los productos de construcción, mientras que la Parte B es específica para los productos bituminosos. Al preparar EPD para una mezcla bituminosa, se deben seguir todos los requisitos descritos en la parte A y B.

El "NPCR-Parte B" de Noruega se basa en el PCR de EAPA, pero se añaden una serie de requisitos nacionales adicionales [55]. Por ejemplo, el NPCR es más abierto y desarrolla EPD que cubren también las etapas de construcción, uso y EOL (A 4-5, B 1-7, C 1-4 en la Figura 7): el neumático con clavos en invierno es un mecanismo de fallo nórdico de un pavimento bituminoso y, obviamente, debe ser incluido. Para facilitar la emisión de las EPD, la Asociación Noruega de Contratistas ha finalizado recientemente un generador de EPD para mezclas bituminosas para las condiciones noruegas. Esta herramienta ayudará a los contratistas a desarrollar y presentar un documento de EPD para cualquier tipo de combinación, basado en el marco de NPCR descrito anteriormente. La Figura 9 muestra un ejemplo de un EPD para una mezcla bituminosa, basado en el nuevo generador noruego de EPD. Puede encontrar más información en The Norwegian EPD Foundation <https://www.epd-norge.no>.



Figura 8: Ejemplo de reglas de categoría de producto nacional (Noruega).

Environmental Declaration ISO 14025/ISO 21930





The Norwegian EPD Foundation

**AGB 11 asfalt (bransjegjennomsnitt)**      **NEPD nr:** 216N

Godkjent i tråd med ISO14025 [1], §8.1.4

*Sunn Fosfall*      Gyldig til: 31.12.2016



**Figur 1**

Miljøindikatorer  
Fra råvareutvinning til legging av asfalt

	Vugge til port	Legging	
Global oppvarming:	48	8	kg CO <sub>2</sub> /DE
Energiforbruk:	1 011	516	MJ/DE
Andel fornybare materialer:	10		%
Produksjonstemperatur:	150		°C

I AGB11-produksjon brukes aminet Tall oil fatty acids, polyethylenepolyamine condensat med CAS nr 68910-93-0. Kjemikallet står ikke på Obs-listen.

**Informasjon om produktet:**

Deklarert enhet: 1 tonn asfalt fra vugge til port (obligatorisk) og legging av asfalt (frivillig)  
 Produktets levetid: Se under "Tilleggsinformasjon".  
 Analyseomfang: Denne miljødeklarasjonen omfatter kun vugge til port, i tillegg til legging av asfalten  
 Årstall for studien: 2011  
 Årstall for data: Gjennomsnittlig produksjons- og utslippsdata fra FAV i 2010  
 Antatt markedsområde: Norge  
 Kontaktperson: Arne Aakre, Telefon: 91779252, aa@eba.no

**Verifikasjon av data:**  
Uavhengig verifikasjon av data og annen miljøinformasjon er foretatt av seniorforsker Anne Rønning med ISO14025, §8.1.3.

**Deklarasjonen er utarbeidet av:**  
Camilla Skjerve-Nielsen og Kari-Anne Lyng, Østfoldforskning AS [2]

**PCR:** NPCR 018 for asfalt og pukk      

**Om EPD:**  
EPDer fra andre programoperatører enn Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner er nødvendigvis ikke sammenlignbare.

**Informasjon om produsent:**  
**EBA – Entreprenørforeningen Bygg og Anlegg**  
Postboks 5485 Majorstua, 0305 Oslo

NS-ENISO 14001-sertifisert: -/-

**Produktspesifikasjon**      Tabell 1

	Masse kg/ff	Andel %	Datakvalitet				Andel resirkulerte materialer
			Deklarererte data			Scenario Legging	
			Produksjon av råvarer	Transport av råvarer	Produksjonsfase for produktet		
Bitumen	51	5 %	Spesifikke databasedata	Spesifikke data			
Pukk	831	83 %	Spesifikke data	Spesifikke data			
Asfalt (gjennbruk)	98	10 %	Altikert til forrige bruk	Altikert til forrige bruk	Spesifikke data	Scenario	
Kalksteinsfyller	20	2 %	Spesifikke databasedata	Spesifikke data		100 %	
Amin	0,2	0 %	Spesifikke databasedata	Spesifikke data			

NEPD nr.: 216N

1/4

Figura 9: Ejemplo de EPD nacional para mezcla bituminosa noruega de 11 mm (AGB 11). Cálculos desde la cuna hasta la puerta (obligatorio) con información opcional sobre el consumo de energía y las emisiones provenientes de la colocación y la compactación.

### 5.1.5. Experiencia en los Estados Unidos

En los Estados Unidos, se han realizado esfuerzos para producir PCR y EPD para productos de mezcla bituminosa y hormigón. El desarrollo de estas EPD alienta a los productores de materiales a hacer que su producto sea más competitivo en términos ambientales. Además, el desarrollo de los EPD sigue el desarrollo de los Códigos de Construcción Sostenible Internacional y otros esfuerzos legislativos (por ejemplo, [56], así como la mejora de la percepción pública de la infraestructura.

En el ámbito de la mezcla bituminosa, el desarrollo de los PCR y los EPD se realizó en la National Asphalt Pavement Association (NAPA) [57] incluyendo en este programa, productores de mezcla

bituminosa, contratistas, tomadores de decisiones, diseñadores de pavimentos y cualquier usuario relacionado con mezclas de asfalto con interés en los análisis de ciclo de vida LCA. NAPA, como operador del programa, facilitó este esfuerzo de abajo hacia arriba, en el que involucró a las partes interesadas dispuestas a la adopción voluntaria (que es un proceso diferente del enfoque impulsado por la regulación de arriba hacia abajo). Las dificultades encontradas en el proceso de desarrollo, como los desafíos técnicos asociados con el procedimiento de LCA (por ejemplo, definición de los límites del sistema, la asignación), la recopilación de datos de calidad, la armonización con la industria del petróleo o las partes interesadas en la producción están resumidas en la referencia [58].

La Asociación de Cemento de Portland (PCA) ha liderado los esfuerzos para desarrollar las EPDs para productos cementicios basados en las PCRs definidas por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) [59], que cumple con la norma ISO 14025 [52]. Las EPD se desarrollaron para cemento portland, mampostería y cemento mezclado o con adiciones, basadas en los datos obtenidos respectivamente de 22, 15, y 9 productores de cemento de USA. Así, se establecieron los impactos ambientales medios apropiados de la industria asociados con la producción de los tres tipos de cemento [58]. El objetivo del programa PCA EPD consistía en "equilibrar la necesidad de productos cementicios de la sociedad con la administración del aire, la tierra y el agua, junto con la conservación de la energía y los recursos naturales". Se pueden encontrar más detalles en [https://www.cement.org/structures/manufacturing/ Informes de impacto ambiental](https://www.cement.org/structures/manufacturing/Informes%20de%20impacto%20ambiental).

La National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) ha sido un operador del programa EPD de hormigón, dirigido a ayudar a los productores y proveedores de hormigón a cumplir con los nuevos requisitos en los sistemas de calificación de edificios ecológicos, como LEED v4, y otros requisitos novedosos, como el Código de Construcción Ecológico, con el objetivo principal de facilitar el desarrollo, la verificación y la publicación de EPDs certificadas para el hormigón y sus derivados. Como parte del programa, NRMCA ha desarrollado las Instrucciones para el operador del programa de EPDs, que definen cómo NRMCA adopta y desarrolla los PCRs, conduce el LCA y certifica las EPDs con el fin de mantener niveles de consistencia relativamente altos. Basado en los datos recogidos para el programa de las EPDs, NRMCA desarrolló las EPDs para el sector en toda la industria, que representaba el promedio de la industria (punto de referencia), que los productores pueden usar para evaluar su producto con respecto a la línea base de la industria [61]. Los valores de referencia se desarrollaron para los impactos ambientales del hormigón con diferentes fortalezas, aplicaciones y condiciones de exposición para el nivel nacional y para ocho regiones. Puede encontrar más información en <https://www.nrmca.org/sustainability/EPDProgram/Index.asp#NRMCAEPDProgram>.

## 6. ESTADO ACTUAL EN LA CONTRATACIÓN PÚBLICA ECOLÓGICA (GPP)

La contratación pública ecológica (en adelante GPP) es una práctica de contratación pública en la que se seleccionan los productos y servicios con mejor desarrollo ambiental sobre los productos y servicios que típicamente se adquirirían. Muchos países parecen estar interesados en la GPP como una herramienta útil para promover una solución sostenible para obras viales. Por ejemplo, la Comisión Europea ha emitido el documento de trabajo que proporciona las pautas de la GPP en el campo del diseño, construcción y mantenimiento de carreteras [62], aunque su aplicación actual parece ser bastante limitada. Los resultados de la encuesta detallados en la Sección 2 de este informe también indican que la introducción de la GPP es inexistente o se encuentra en una etapa preliminar en la práctica actual (por ejemplo, en proyecto piloto). A continuación se resumen varios ejemplos de esfuerzos preliminares en la implementación de la GPP.

En los Países Bajos, los impactos ambientales basados en una puntuación del LCA se utilizan como parte de los criterios de adjudicación para la mayoría de los proyectos de infraestructura. Utilizando la herramienta de infraestructura LCA "DuboCalc", el DOT modela un diseño de pre-licitación y una puntuación LCA [63]. Este puntaje se traduce en un valor monetario utilizando los costos de reducción para el daño ambiental potencial creado, que generalmente comprende entre el 5 y el 15 % del valor del Proyecto, de tal forma que si los contratistas proponen un proyecto con impactos ambientales por debajo de los umbrales predefinidos, su coste total del proyecto se descontará proporcionalmente a la mejora relativa, ganando el contrato la oferta combinada 'más baja'. Los contratos se basan en las prestaciones y los contratistas y proveedores pueden enviar los datos a la llamada "Base de Datos Nacional", que es utilizada por DuboCalc a través de las EPDs, lo que permite una alta calidad y la posibilidad de incluir materiales innovadores durante el proceso de licitación. También se aplican otras prácticas de contratación pública ecológica en las que los contratistas se clasifican según sus prestaciones de emisión de dióxido de carbono para sus operaciones y también se aplican los criterios de selección de materiales. Las emisiones de dióxido de carbono se estiman a través de la plataforma de escala de prestaciones de CO<sub>2</sub> [64]. Por lo tanto, el contratista es premiado con prácticas comerciales, también llamadas "buen mantenimiento", y operaciones, adquisición de material ecológico y de diseño del proyecto.

En Bélgica, se está estableciendo un proyecto piloto en el que juegan en la contratación los indicadores ambientales y sociales, además de los costes directos, [65]. El GWP y el agotamiento de los materiales se valoran mediante la evaluación de la distancia y el modo de transporte de las materias primas y el asfalto, el nivel de áridos reciclados en la mezcla, el consumo de energía y el uso de energía renovable y el RR. También se considera en la adquisición, el ruido del tráfico tanto en la construcción como en fase de uso. En la licitación, los costes directos de las obras viales se combinan con una valoración de sostenibilidad, con el objetivo de otorgar al contratista, las obras viales con el mejor equilibrio entre coste y medidas de sostenibilidad.

En Noruega, el programa de EPDs para mezclas bituminosas se describe en la Sección 5.1.2.2. Se ha utilizado para facilitar el movimiento hacia la práctica de GPP. La Administración de Carreteras Públicas de Noruega (NPRA, por sus siglas en inglés) ha alentado a los contratistas a presentar e incluir un documento de EPDs en sus ofertas en 2018 como primer paso. Como segundo paso, en 2019, ha convertido en obligatoria la inclusión de EPDs. En 2019, también se prueban diferentes enfoques para utilizar activamente las EPD en el proceso de licitación (adjudicación de contratos)

en un número limitado de empleos del asfalto, determinando la NPRA, sobre la base de estas experiencias, cómo y cuándo puede convertirse en un criterio general de adquisición. Los criterios medioambientales aún no se han implementado en las adquisiciones de pavimento asfáltico en Noruega, pero los objetivos nacionales e internacionales con respecto a la reducción de CO<sub>2</sub> están impulsando el desarrollo. Los trabajos en diferentes tipos de contratos están en progreso, y se espera que dentro de poco tiempo los constructores y los propietarios de las carreteras consideren los factores ambientales y sociales, además de los costes.

En los Estados Unidos, el estado de California está respondiendo a las políticas y la legislación que requieren la reducción de los gases de efecto invernadero y otros contaminantes y al cumplimiento de otros objetivos de sostenibilidad y cambio climático [56]. Como resultado, California está realizando un esfuerzo para exigir EPDs en diversos materiales en los proyectos de transporte y se están realizando los esfuerzos para recopilar datos que realicen pruebas comparativas de materiales y procesos de manera uniforme, utilizar los LCA y desarrollar estrategias para reducir las emisiones de GEI y GWP. A partir de enero de 2019 el Departamento de Transporte de California solicita y requiere las EPDs para diversos materiales utilizados en los proyectos de transporte. Sobre la base de los datos recopilados, se establecerán las líneas de base y los objetivos de GWP. Actualmente se están considerando iniciativas similares en el estado de Washington [66].

En el Reino Unido, el ruido, la biodiversidad y la calidad del aire ya se identifican como indicadores clave de prestaciones y los GPP se aplica a los sitios identificados como sensibles al ruido. En Francia, para algunas obras viales se otorga una bonificación cuando se cumplen ciertos criterios ambientales, como el nivel de reciclaje o la aplicación de técnicas de mezcla bituminosa de baja temperatura. Y lo mismo en España, donde el desarrollo de las EPD y la introducción de un Índice de Sostenibilidad está en curso y se espera que su uso sea obligatorio en el futuro próximo. En Austria, en algunas licitaciones se impone una distancia máxima entre las obras viales y la planta de asfalto.

En Canadá, una agencia está buscando avanzar con los GPPs y transformar sus estrategias de adquisición para incorporar la sostenibilidad en el proceso.

En Sudáfrica, la Ciudad de Ciudad del Cabo tiene un borrador de política de compra ecológica en vigor, pero aún no ha sido probado.

Los principales retos para la introducción más amplia de las GPPs son la objetivación de medidas de sostenibilidad, la disponibilidad de contratos innovadores y la reversión de la resistencia al cambio.

## 7. RECOMENDACIONES

Este documento informa sobre las prácticas usadas en los pavimento sostenibles que se utilizan actualmente a lo largo del ciclo de vida del pavimento, las tendencias en el uso de materiales sostenibles, la evaluación de la sostenibilidad y la adquisición sostenible, además de evaluar e informar sobre los resultados de la encuesta sobre prácticas de sostenibilidad y técnicas de pavimentación ecológica (GPT), que arrojan cierta luz sobre algunas de las tecnologías establecidas y emergentes en este campo.

Las principales conclusiones se pueden resumir de la siguiente manera:

- La mayor parte de los GPTs se aplica a las fases de producción y construcción de materiales.
- En el campo del diseño, los pavimentos de larga vida pueden proporcionar múltiples beneficios de sostenibilidad.
- En el campo de la producción de materiales, se puede obtener un beneficio en términos de reducción de GEI cambiando de las fuentes tradicionales de calefacción fósil a las renovables, como los biocombustibles o los pellets de madera.
- El uso de tecnologías probadas y bien investigadas (por ejemplo RAP, WMA) son prácticas recomendables.
- La mano de obra adecuada y los procedimientos de control de calidad buenos son factores clave para los pavimentos de larga duración.
- La reducción de las distancias de transporte de materiales y la consideración del reciclado in situ pueden compensar los impactos ambientales.
- La aplicación de las prácticas de mantenimiento adecuadas puede ayudar a mantener la resistencia a la rodadura baja y tener un impacto positivo del consumo de combustible del vehículo en la fase de uso.
- La implementación de materiales que prevén el reciclaje futuro reduce los impactos de la etapa final de la vida útil.
- Para algunas técnicas ecológicas, la investigación adicional y los datos a largo plazo son necesarios para eliminar las dudas de igual prestaciones que las técnicas convencionales.
- La falta de contratos o licitaciones innovadoras, y la resistencia al cambio está obstaculizando la implementación de la Contratación pública ecológica (GPP).
- La promoción de GPP a través de bonos o la adjudicación de proyectos piloto podría ayudar con la implementación de GPP.
- Los esfuerzos legislativos de arriba hacia abajo han mostrado ser un gran potencial para estimular y promover las técnicas de pavimentación ecológica (GPT).

## 8. GLOSARIO

Termino	Definition	Definición
AASHTO	Americal Association of State Highway and Transportation Officials	Asociación Americana de Carreteras del Estado y Oficiales de Transportes
ADP	Abiotic Depletion Potential	Potencial de agotamiento abiótico
AP	Acidification potential	Potencial de acidificación
CE	Circular Economy	Economía circular
CEN	European Committee for Standardization	Comité Europeo de Normalización
CF	Carbon Footprint	Huella de carbono
CIR	Cold In-place Recycling	Reciclado en frio in situ
CPR	Central Plant Recycling	Reciclado en central
CRA	Carlo Ratti Associati	Asociación Carlo Ratti
CWA	CEN Workshop Agreement	Acuerdo CEN Workshop
EAPA	European Aspalt Pavement Association	Asociación Europea de Pavimentos de Mezcla bituminosa
EOL	End-of-life	Final de vida
EPD	Environmental Product Declaration	Declaración ambiental de producto
ERTRAG	European Road Transport Research Advisory Group	Grupo europeo de investigación del transporte por carretera
ETP	Eco-toxicity Potential	Potencial de ecotoxicidad
EU	European Union	Unión Europea
GHG	Green House Gases	Gases de efecto invernadero
GPP	Green Public Procurement	Contratación pública ecológica
GPT	Green Paving Technique	Técnica de pavimentación ecológica
GWP	Global Warming Potential	Potencial de calentamiento global
HIR	Hot In-place Recycling	Reciclado en caliente in situ
HMA	Hot Mix Asphalt	Mezcla bituminosa en caliente

HTP	Human Toxicity Potential	Potencial de toxicidad humana
IC	Intelligent Compaction	Compactación inteligente
IFSTTAR	French Institute of Science and Technology for Transport	Instituto Francés de Ciencia y Tecnología para el Transporte
IR	Infrared	Infrarrojo
IRI	International Roughness Index	Índice Internacional de Rugosidad
IS	Infrastructure System	Sistema de infraestructura
ISO	International Organization for Standardization	Organización Internacional de Normalización
ISCA	Infrastructure System Council of Australia	Consejo de los Sistemas de Infraestructura de Australia
LCA	Life Cycle Assessment	Análisis de ciclo de vida
MPD	Mean Profile Depth	Profundidad media del perfil
NAPA	National Asphalt Pavement Association (USA)	Asociación Nacional de Pavimentos de Mezcla Bituminosa (USA = EEUU)
NPCR	Norwegian PCR	PCR noruega
NPRA	Norwegian Public Roads Association	Asociación de caminos públicos de Noruega
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association (USA)	Asociación Nacional de Hormigón Preparado (USA)
ODP	Ozone Depletion Potential	Potencial de agotamiento de ozono
PA	Porous Asphalt	Mezcla Bituminosa porosa
PCA	Portland Cement Association	Asociación de Cemento de Portland
PCC	Portland Cement Concrete	Hormigón de Cemento de Portland
PCR	Product Category Rules	Reglas de Categoría de Producto
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential	Potencial de creación de ozono fotoquímico
QC	Quality Control	Control de calidad
RA	Reclaimed Asphalt	Mezcla bituminosa recuperada
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement	Pavimento de mezcla bituminosa recuperada

RAS	Reclaimed Asphalt Shingles	Tejas asfálticas recuperadas
RR	Rolling Resistance	Resistencia a la rodadura
SCM	Supplementary Cementitious Materials	Materiales suplementarios de cemento
SPI	Sustainability Performance Index	Índice de rendimiento de sostenibilidad
SR	Solar Road	Camino solar
'USA	United States of America	Estados Unidos de America
WMA	Warm mix asphalt	Mezcla bituminosa de baja temperatura

## 9. REFERENCIAS

- [1] PIARC TC 4.2. Report. (2015) Reducing the Life Cycle Carbon Footprint of Pavements.
- [2] Maeck, J. (2019) Sustainability of roads: survey results critically analysed, Belgian Road Reserach Centre.
- [3] BAA. (2017) Guidelines Hinweise zur Bauweise Beton and Asphalt.
- [4] Van Dam, T. et al. (2015) Towards sustainable pavement systems: a reference document (No. FHWA-HIF-15-002). United States. Federal Highway Administration.
- [5] Cleghorn, A. (2015) The Self- cementing Perfomance Properties of Recycled Concrete in Road Pavement Materials, Stellenbosch University.
- [6] Brand, A.S., Amirkhanian, A.N. and Roesler, J.R. (2014) Flexural capacity of full-depth and two-lift concrete slabs with recycled aggregates, Transportation Research Record (No. 2456(1)), pp.64-72.
- [7] Brand, A.S. and Roesler, J.R. (2015) Ternary Concrete with Fractionated Reclaimed Asphalt Pavement, ACI Materials Journal, 112(1).
- [8] Calvert, G. (1977) Iowa DOT's Experience with Recycling Portland Cement Pavement and Asphalt Cement Pavement, MIR, 77, p.4.
- [9] Wojakowski, J. (1998) High performance concrete pavement (No. FHWA-KS-98/2), Kansas Department of Transportation.
- [10] Sommer, H. (1994) Recycling of concrete for the reconstruction of the concrete pavement of the motorway Vienna-Salzburg. In Proceedings of the 7th International concrete roads Symposium, pp. 3-5.
- [11] Gillen, S.L., Brand, A.S., Roesler, J.R. and Vavrik, W.R. (2012) Sustainable long-life composite concrete pavement for the Illinois tollway. In Proceedings of the International Conference on Long-Life Concrete Pavements, 2.
- [12] Damineli, B.L. et al. (2010) Measuring the eco-efficiency of cement use, Cement and Concrete Composites, 32(8), pp.555-562.
- [13] Choate, T.W. (2003) Energy and emission reduction opportunities for the cement industry, industrial technologies program, US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 14, pp.24-29.
- [14] United States Environmental Protection Agency Office of Policy. (1995) Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks, 1990-1994 (No. 96), US Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning, and Evaluation.
- [15] Wilson, M.L. and Kosmatka, S.H. (2011) Design and control of concrete mixtures, High-Performance Concrete, 15, p.299.
- [16] Juenger, M. and Siddique, R. (2015) Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, Cement and Concrete Research, 78, pp.71-80.
- [17] AASHTO. (2018) Standard Specification for Blended Hydraulic Cements (No. M 240).

- [18] Van Dam, T. and Smith, K.D. (2011) Tech Brief: Blended and Performance Cements (No. FHWA-HIF-11-025), Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [19] Cement Association of Canada. (2009) Backgrounder: Portland-Limestone Cement, Cement Association of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- [20] Cement Association of Canada. (2016) Environmental Product Declaration (EPD): General Use (GU) and Portland- Limestone (GUL) Cements.
- [21] Chen, C. et al. (2010) LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete, Resources, Conservation and Recycling, 54(12), pp.1231-1240.
- [22] Sabita. (2011) Manual 32: Best Practice Guideline for Warm Mix Asphalt (ISBN 978-1-8974968-55-1).
- [23] Transportation Reserach Circular E-C135. (2012) Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements : Papers from a Workshop, Washington, DC.
- [24] George, T.B. (2018) Advanced characterisation of hot mix asphalt with recycled crushed glass. Doctoral dissertation, Stellenbosch University.
- [25] Islam, G.S., Rahman, M.H. and Kazi, N. (2017) Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice, International Journal of Sustainable Built Environment, 6(1), pp.37-44
- [26] Du, H. and Tan, K.H. (2017) Properties of high volume glass powder concrete, Cement and Concrete Composites, 75, pp.22-29.
- [27] Aurstad, J., Uthus, N.S., Telle, R.B. and Bakløkk, L.J. (2016) The Influence of Asphalt Workmanship on Pavement Service Life. In Proceedings of E&E Congress 2016| 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Czech Republic.
- [28] Sandberg, U., Bergiers, A., Ejsmont, J., Goubert, L., and Zoller, M. (2012) Rolling Resistance - Measurement Methods for Studies of Road Surface Effects, MIRIAM consortium.
- [29] Ejsmont, J.A., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G. and Wilde, W.J. (2014) Rolling resistance measurements at the MnROAD facility, Round 2 (No. MN/RC 2014-29).
- [30] MIRIAM consortium. (2009) MIRIAM Project Homepage, Available at: <http://miriam-co2.net/index.htm>.
- [31] Wang, T. et al. (2012) UCPRC life cycle assessment methodology and initial case studies for energy consumption and GHG emissions for pavement preservation treatments with different rolling resistance (No. UCPRC-RR-2012-02).
- [32] Schaefer, V. et al. (2010) Construction and performance of pervious concrete overlay at Minnesota Road Research Project, Transportation Research Record, 2164(1), pp.82-88.
- [33] Skarabis, J. and Stöckert, U. (2015) Noise emission of concrete pavement surfaces produced by diamond grinding, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2(2), pp.81-92.

- [34] D. S. Inc. Next Generation Concrete Surface, Available at: <https://www.diamondsurfaceinc.com/services/diamond-grinding/next-generation-concrete-surface-ngcs/>.
- [35] Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (Guidelines for road maintenance planning and measures), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) (Road and Transportation Research Association), Cologne.
- [36] Chesner, W., Collins, R. and M. MacKay. (1998) User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction (No. FHWA-RD-97-148), Federal Highway Administration, McLean, VA.
- [37] Hansen, K.R. and Copeland, A. (2013) Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009–2012, Information Series 138, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD.
- [38] American Society for Testing and Materials. (2013) ASTM D4215 Standard Specification for Cold-Mixed, Cold-Laid Bituminous Paving Mixtures (No. ASTM D4215).
- [39] Al-Qadi, I.L., Elseifi, M. and Carpenter S.H. (2007) Reclaimed Asphalt Pavement—A Literature Review (No. FHWA-ICT-07-001), Illinois Department of Transportation, Springfield, IL, USA.
- [40] Federal Highway Administration (FHWA) (2018) Tech Brief: Overview of Project Selection Guidelines for Cold In-Place and Cold Central Plant Pavement Recycling (No. FHWA-HIF-17-042), Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif17042.pdf>.
- [41] Stroup-Gardiner, M. (2011) Recycling and reclamation of asphalt pavements using in-place methods (No. Project 20-05 (Topic 40-13)).
- [42] Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA)(2001b) Basic Asphalt Recycling Manual. Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Annapolis, MD, USA.
- [43] ANTER & IECA (2018) Manual de firmes reciclados in situ con cemento, National Technical Association of Soil Stabilizers and Pavement Recycling & Spanish Institute of Cement and its Applications., Madrid, Spain.
- [44] Diaz, J., Potti, J. J., and Vaquero, J. (2015) The state of the art of cold in place recycling of pavements in Spain. in *XXV World Road Congress of PIARC*, Seoul, Republic of South Korea.
- [45] Gonzalo, H. et al. (2019) Advances in the study of the behaviour of Full-Depth Reclamation (FDR) with cement. University of Burgos (Spain). Article Applied Science.
- [46] Federal Highway Administration (FHWA) (2007) Use of Recycled Concrete Pavement as Aggregate in Hydraulic-Cement Concrete Pavement. Technical Advisory T 5040.37. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [47] Florea, M.V.A. and Brouwers, H.J.H. (2012) Recycled concrete fines and aggregates: the composition of various size fractions related to crushing history. In Proceedings of the international conference on building materials (IBAUSIL), pp. 1034-41.

- [48] Kuennen, T. (2007) ECONOMICS OF RECYCLING-Aggregate operations nationwide grapple with the economics of producing recycled materials in a rapidly changing marketplace, Rock Products, 110(10), pp.20-27.
- [49] Horvath, A. (2004) A Life-Cycle Analysis Model and Decision-Support Tool for Selecting Recycled Versus Virgin Materials for Highway Applications. RMRC Research Project No 23. Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- [50] ISO 14040 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- [51] ISO 14044 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- [52] ISO-14025 (2006) Environmental labels and declarations - Type III Environmental declarations - Principles and procedures.
- [53] CWA 17089 (2016) Indicators for the sustainability assessment of roads - CEN Workshop Agreement.
- [54] European Asphalt Pavement Association (EAPA) (2017) Guidance document for preparing Product Category Rules (PCR) and Environmental Product Declarations (EPD) for asphalt mixtures.
- [55] Norwegian EPD Foundation (2017) PCR – Part B for Asphalt NPCR 025:2017 Version 1.0.
- [56] Buy Clean California Act (AB 62) (2017), available at: <https://www.dgs.ca.gov/pd/Programs/Engineering/AB262.aspx>.
- [57] Mukherjee, A. (2016) A Life Cycle Assessment for Asphalt Mixtures to Support the National Asphalt Pavement Institute: Lanham, MD, USA.
- [58] Mukherjee, A. and Dylla, H. (2017) Challenges to Using Environmental Product Declarations in Communicating Life-Cycle Assessment Results: Case of the Asphalt Industry. Transportation Research Record, 2639(1), pp.84-92.
- [59] ASTM (2014) Product Category Rules For Preparing an Environmental Product Declaration for Portland, Blended Hydraulic, Masonry, Mortar, and Plastic (Stucco) Cements Category.
- [60] Portland Cement Association (PCA) (2016) Environmental Product Declaration (EPD) for portland cements (per ASTM C150, ASTM C1157, AASHTO M85 or CSA A3001).
- [61] National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) (2016) NRMCA Member Industry-Wide EPD for Ready Mixed Concrete.
- [62] European Commission (2016) Commission Staff Working Document: EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance.
- [63] Dubocalc, Dubocalc Software, available at: <https://www.dubocalc.nl>.
- [64] CO2-Performance Ladder, available at: [https://www.skao.nl/home\\_en](https://www.skao.nl/home_en).
- [65] Maeck, J. and Redant K. (2018) Moving toward green public procurement in Belgium, in Proceedings of 7th Transport Research Arena (TRA), Vienna, Austria.
- [66] Carbon Leadership Forum (2019) Buy Clean Washington: Study Overview.



*Copyright by the World Road Association. Reservados todos los derechos*

*World Road Association (PIARC)*

*La Grande Arche, Paroi Sud, 5e étage, F-92055 La Défense cedex*

*ISBN 978-2-84060-600-0*