

Proyecto LIFESURE: Análisis de Ciclo de Vida de mezclas bituminosas templadas recicladas de alta tasa

Lifesure Project: Life Cycle Analysis of Half-Warm Bituminous Mixtures at High Recycling Rates

Marcos Perelli Botello^{1*}, Patricia Díaz Martín², Emilio Martínez Herranz³, Tomás García Sanz⁴, Jorge Gómez Fernández⁵

Resumen

El objetivo del proyecto LIFESURE (www.lifesure.es) ha sido desarrollar tecnologías que permitan fabricar de modo eficiente mezclas bituminosas templadas recicladas a tasa total en capas de base, intermedia y rodadura, aptas para vías urbanas, de manera que contribuyan a la sostenibilidad del patrimonio viario urbano mediante la reutilización de materiales de gran calidad, con bajo consumo de energía y baja generación de emisiones en su fabricación.

La mezcla bituminosa reciclada templada incluye la combinación de dos tecnologías que la hace muy interesante desde la óptica de los tres pilares de la sostenibilidad (económico, medioambiental y social): reutilización de materiales, ahorro en materias primas y costes, mejora de las condiciones de seguridad y de salud de los operarios, así como la reducción en consumo de energía y en emisiones a la atmósfera.

Con objeto de valorar las ventajas medioambientales de las mezclas desarrolladas en el proyecto se ha incluido la realización de un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El presente artículo describe y expone sus conclusiones más relevantes. Se trata de un ACV de tipo comparativo entre las capas de rodadura de tres mezclas (dos templadas de alta tasa y un hormigón bituminoso para su contraste), extendidas en la calle Méndez Álvaro de Madrid.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Ciclo de Vida (CV), carreteras, firmes, mezclas recicladas templadas de alta tasa.

Abstract

The LIFESURE Project (www.lifesure.es) is aimed at demonstrating the effectiveness of half-warm bituminous mixtures at total recycling rates (100% reclaimed asphalt pavement) suitable for base, binder and wearing courses construction in urban pavements so as to contribute to the sustainability of urban areas by reusing high quality materials, with low energy consumption and low GHG emissions in their manufacture.

Recycled half-warm bituminous mixtures include the combination of two technologies. It increases its appeal from the point of view of the three pillars of sustainability (economic, environmental and social): reusing materials, reductions of natural aggregates and savings in costs, improvement of health operators' conditions, as well as the reduction in energy consumption and emissions to the atmosphere.

In order to assess the environmental advantages of the bituminous mixtures developed within the project, a Life Cycle Analysis (LCA) study has been carried out. This article describes and presents the most relevant conclusions reached. The LCA performed is a comparative study between the three surface courses (two half-warm bituminous mixtures recycled at high rates -70% and 100%- and one conventional bituminous mixture as baseline), implemented in Méndez Álvaro street (Madrid).

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle (LC), roads, pavements, half-warm bituminous mixtures recycled at high rates.

1. EL PROYECTO LIFESURE

Desde la aparición del protocolo de Kyoto se ha hecho necesario que los fabricantes de mezclas bituminosas investiguen sobre el desarrollo de procesos o productos que minimicen los impactos medioambientales negativos que se producen durante su fabricación. A ello se suma la

existencia de directivas europeas que señalan la necesidad de reducir los residuos generados, aumentando los niveles de reciclado y recuperación.

El proyecto LIFESURE: Pavimentos urbanos sostenibles: Reducción del impacto ambiental de las áreas urbanas (*Self-sustaining Urban Roads: A way to improve Environmental performance of urban areas*), finalizado recientemente

* Autor de contacto: Marcos.Perelli@cedex.es

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Técnico-Científico de Proyectos. Área de Construcción y Medioambiente. Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnico de Proyectos de Innovación. SACYR.

³ Licenciado en Ciencias Ambientales. Jefe del Departamento de Apoyo Técnico e Innovación. Ayuntamiento de Madrid.

⁴ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Asesor Técnico del Departamento de Apoyo Técnico e Innovación. Ayuntamiento de Madrid.

⁵ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Técnico-Científico de Proyectos de Innovación. Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.



(diciembre de 2018), ha tenido una duración de 5 años, y ha estado enmarcado dentro del instrumento europeo financiero de la Comisión Europea para el Medio Ambiente LIFE+2012, con un presupuesto de 2,37 millones de euros (50% cofinanciado por la Unión Europea). En el proyecto han participado Sacyr Construcción como coordinador, y el CEDEX y el Ayuntamiento de Madrid como socios colaboradores.

El objetivo del proyecto ha sido desarrollar tecnologías que permitan fabricar de modo eficiente mezclas bituminosas templadas recicladas a alta tasa para vías urbanas en todas las capas del firme, de manera que contribuyan a la sostenibilidad del patrimonio viario urbano mediante la reutilización de materiales de gran calidad así como con la reducción en el consumo de energía y en la generación de emisiones en su fabricación.

La tecnología de reciclado templado consiste en fabricar un nuevo tipo de mezcla:

- a temperaturas por debajo de 100°C, muy inferiores a las temperaturas de las mezclas calientes convencionales, las cuales rondan los 160°C (figura 1);
- utilizando material RAP¹ como materia prima procedente del fresado previo de los firmes de las carreteras a rehabilitar; y
- utilizando como ligante una emulsión bituminosa (capaz de regenerar las propiedades del ligante envejecido presente en el RAP y que permite poder trabajar y compactar las mezclas fabricadas a estas temperaturas, sin los problemas que pueden darse con el uso de betunes asfálticos).

Este tipo de mezclas presentan un elevado interés para la rehabilitación de vías en las que no sea conveniente recrecer la cota de la calzada, como calles urbanas y travesías. Así mismo, los beneficios de esta tecnología novedosa son económicos, medioambientales y sociales, sin pérdida de calidad en el producto finalmente obtenido, lo que constituye el aspecto más innovador del proyecto.

En efecto, la posibilidad de reutilizar el material fresado tiene un alto interés medioambiental y económico ya que, en general, reduce:

- el consumo de materias primas (principalmente áridos naturales y ligante);

- la cantidad de residuos (material fresado) destinados a vertedero; y
- los transportes de materiales (en txkm) ya que, además de las cantidades transportadas, también se suelen reducir las distancias de transporte (desde canteras, a vertedero, reciclado *in situ*, etc.).

Si además se consigue que la temperatura de fabricación no exceda los 100 °C (mezclas templadas) se logran importantes mejoras medioambientales, de seguridad y salud laboral, y previsiblemente también económicas. En efecto, con la fabricación de mezclas asfálticas a menor temperatura que la de una Mezcla Bituminosa Convencional (MBC):

- se reduce el consumo de combustible, tanto durante la fabricación de la mezcla como en el proceso de almacenaje del ligante; y
- se produce un menor envejecimiento del ligante, lo que *a priori* aumenta la durabilidad de la mezcla.

Por lo tanto, además de las ventajas medioambientales de estas mezclas recicladas templadas (utilización de material reciclado y fabricación a menor temperatura) cabe constatar un ahorro de combustible y, con ello, una reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en relación con los emitidos por una MBC equivalente, así como la utilización de maquinaria convencional en su transporte y puesta en obra. Además, pudiera ser que la aplicación conjunta de ambas técnicas potenciara las ventajas de cada una de ellas al aplicarse por separado.

En concreto, la iniciativa propuesta en este proyecto LIFESURE es novedosa por la combinación entre la fabricación de mezclas bituminosas templadas (donde la temperatura de fabricación es inferior a 100 °C) y, al mismo tiempo, la reutilización de RAP procedente del fresado de vías urbanas en la elaboración de mezclas bituminosas recicladas de alta tasa. Se ha de destacar además que existe todavía poca experiencia en mezclas con altas tasas de reciclado, sobre todo en su utilización en capas de rodadura.

El proyecto se ha dividido en las siguientes fases:

- Caracterización del fresado y diseño de las mezclas.
- Desarrollo de un prototipo específico de planta de fabricación de mezclas bituminosas recicladas templadas de alta tasa (figura 2).

¹ RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement* (AR: Asfalto Reciclado).

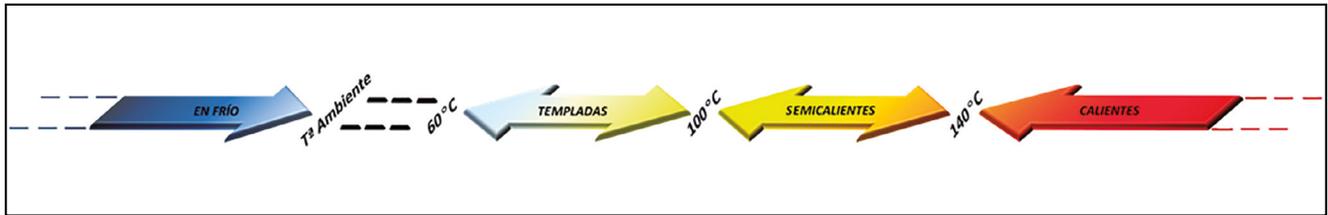


Figura 1. Tipos de mezclas bituminosas dependiendo de su temperatura de fabricación.



Figura 2. Planta específica de fabricación de mezclas RTE del proyecto LIFESURE.



Figura 3. Tramos de prueba del proyecto LIFESURE en la pista de ensayo acelerado de firmes del CEDEX.

- Estudio de la viabilidad de estas mezclas mediante la evaluación de su comportamiento a escala real, tanto en distintos tramos de prueba extendidos en la calle Méndez Álvaro de Madrid, como en la pista de ensayo acelerado de firmes del CEDEX (figura 3).
- Realización de un estudio de ACV.
- Elaboración de un estudio pre-normativo.

El presente artículo describe y expone las conclusiones más relevantes de una de las tareas incluidas en el proyecto: la realización de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de tipo comparativo entre las tres mezclas (dos templadas de alta tasa y un hormigón bituminoso para su contraste)

extendidas en la citada vía madrileña. Este estudio ha sido realizado por el CEDEX.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ACV DEL PROYECTO LIFESURE

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica de evaluación, que sirve para estudiar, identificar, medir y cuantificar los aspectos e impactos ambientales potenciales directamente atribuibles a un bien. Así mismo, permite comparar varias opciones o alternativas para seleccionar la más conveniente desde el punto de vista medioambiental. Un ACV se debe evaluar sobre el ciclo de vida (CV) completo, contemplando por tanto todas las fases del bien.



Figura 4. Zona de actuación del proyecto LIFESURE en la calle Méndez Álvaro (Madrid).

2.1. Objetivo del estudio

En concreto, el objetivo principal del estudio ha sido la cuantificación del impacto ambiental de los eco-asfaltos² LIFESURE RTE 70 y RTE 100 (con reciclados de tasa al 70% y total, respectivamente) extendidos en la calle Méndez Álvaro de Madrid (figura 4) mediante la realización de un estudio comparativo de estas dos mezclas templadas recicladas de alta tasa con una mezcla bituminosa en caliente convencional (MBC: hormigón bituminoso AC16D) de referencia («alternativa cero»), construida en un tramo adyacente. La dosificación de cada una de las tres mezclas ha sido la que se señala en la tabla 1.

Tabla 1. Dosificación (%) de cada una de las tres mezclas estudiadas

MEZCLA TIPO		MBC	RTE 70	RTE 100
% emulsión/betún (s/m)		4,5	3,7	2,4
GRAVA (%)	Gruesa (12/18)	10	10	-
	Fina (6/12)	29	20	-
ARENA (%)	Silíceo (0/5)	36	-	-
	Caliza (0/5)	25	-	-
RAP (%)	Gruoso (5/25)	-	43	80
	Fino (0/5)	-	27	20

2.2. Limitaciones

Todo estudio ACV de este tipo presenta una serie de limitaciones, las cuales es necesario mencionar:

- Al igual que la carretera en sí misma, su firme es un elemento que depende de multitud de variables (geometría, estructura, trazado, entorno, tráfico, etc.) que le otorgan el carácter de único.
- Además, este tipo de estudios aplicados a las carreteras y sus firmes son complejos ya que intervienen un gran número de variables así como las interrelaciones entre ellas, de las que en ocasiones

falta aún mucho por conocer sobre su efecto ambiental real.

- Por estas razones, no es sencilla la comparabilidad entre distintos estudios ni directa la obtención de conclusiones generales extrapolando desde las de estudios particulares («carácter no generalista de los resultados»), ya que estas conclusiones vienen muy condicionadas por las hipótesis y el alcance adoptados en el estudio. Cabe también aquí mencionar que uno de los factores relevantes en un ACV es la durabilidad de la solución estudiada, de ahí la importancia de considerar todas las fases del CV. Sin embargo, no se dispone de suficiente información sobre este punto, dado que, por el carácter innovador de este proyecto, no existen referencias previas en las que poder apoyarse.
- A ello se suma además la dificultad y complejidad que supone la obtención de unos datos de entrada de calidad (fiables, exactos, actualizados, validados, etc.) que además representen la realidad del estudio de ACV que se esté realizando. De hecho el Inventario del CV (ICV) es comúnmente la etapa de un ACV en la que ha de emplearse más tiempo y recursos, suponiendo en muchos casos un «cuello de botella» en los trabajos.
- Cabe en este aspecto destacar que se ha tratado de obtener la mayor información específica posible del proyecto, aunque ello no siempre se ha conseguido y, en esos casos, se ha recurrido a información bibliográfica que fuera representativa, atendiendo a su similitud con lo planteado en este proyecto.

Por todas las limitaciones expuestas, se debe señalar que los resultados y conclusiones obtenidos han de enmarcarse dentro del ámbito del propio estudio y condicionados a las hipótesis adoptadas. Ello además viene reforzado por la poca experiencia existente en la aplicación de estas técnicas (recicladas y templadas, de forma combinada) en capa de rodadura, por lo que sería necesario la realización de investigaciones similares y, en especial, se estudie más acerca de su durabilidad; factor que, como ya se ha mencionado, condiciona totalmente los resultados del ACV.

² RTE: Reciclado Templado con Emulsión.

2.3. Características del estudio de ACV

Las características principales del estudio han sido las siguientes:

- Este estudio se ha ajustado a las normas vigentes UNE-EN ISO 14040 y 14044 sobre ACV.
- El sistema de producto considerado ha sido la capa de rodadura de cada una de las tres mezclas (de aproximadamente 5 cm de espesor).
- La «unidad declarada» (UD), que se ha adoptado como referencia para normalizar las entradas (datos) y las salidas (resultados) ha sido el «m² de superficie de firme construido».
- Fases del CV consideradas para las tres mezclas:

1. Obtención de materias primas.
2. Fabricación.
3. Puesta en obra: extendido y compactación principalmente.
4. Transportes: A planta (de fabricación) y Distribución (de la planta al tajo).
5. Gestión de RCD³.
Este estudio de ACV es del tipo «de la cuna a la puerta» en el que se analizan todas las fases que engloba la construcción del firme.

- No se ha considerado la fase de mantenimiento como tal dentro del estudio de ACV. Ello ha sido debido a que, en el ámbito de las carreteras, no existe suficiente experiencia sobre la durabilidad de las mezclas RTE en capa de rodadura. Por otro lado, tampoco existen protocolos específicos de conservación para estas mezclas.
- No obstante, lo que sí se ha realizado es una estimación de la «rentabilidad ambiental» de las dos mezclas RTE respecto de la MBC de referencia. Para realizar esta valoración, se ha adoptado una estrategia teórica de mantenimiento de las tres mezclas (consistente en un bacheo anual y un sellado de grietas cada cinco años durante toda la vida útil de cada una de las tres mezclas).
- Tampoco se han considerado las fases de:
 - Explotación o uso: no se ha considerado esta fase ya que el estudio de ACV realizado es de tipo comparativo y se puede considerar que los impactos de esta fase en cada una de las tres mezclas son iguales o al menos muy similares.
 - Fin de vida: no se puede considerar que una calle urbana como en la que se sitúa el tramo de ensayo tenga un fin de vida propiamente dicho, ya que lo que en realidad sucede es que va teniendo sucesivas operaciones de mantenimiento/conservación/rehabilitación a lo largo del tiempo para mantener las prestaciones exigidas.
Lo que sí se ha considerado es el fin de vida de las cantidades de RAP fresadas en origen y que no se utilizan posteriormente para la fabricación del

RTE de cada una de las mezclas recicladas de alta tasa. El fin de vida de estas cantidades de RAP ha consistido en contabilizar su transporte y disposición final en vertedero de inertes. Todas las actividades necesarias para la consecución de esta tarea han sido englobadas en la que se ha denominado como «Gestión de RCD».

- En la figura 5 se define el alcance así como los límites del sistema de producto adoptado (para las tres mezclas analizadas).
- El software empleado para este estudio ha sido la herramienta **SimaPro v8** (junto con la BB.DD. *EcoInvent* que viene incorporada a esta aplicación).

2.4. Hipótesis adoptadas

Las principales hipótesis consideradas han sido las siguientes:

- Como en cualquier otro estudio de ACV en el que se realizan comparaciones «ambientales» entre diversas alternativas, se ha partido de la base de que las prestaciones funcionales son equivalentes en todas ellas.
- Por otra parte, para eliminar distorsiones en el estudio comparativo y que así puedan atribuirse principalmente los resultados del ACV a la naturaleza de las distintas mezclas así como a la fabricación a distinta temperatura de las mismas, se ha considerado que:
 1. La naturaleza, composición y grado de compactación de las mezclas es uniforme en cada uno de los tres tramos (aunque pueda ser distinto en tramos diferentes). Cabe aquí también señalar que las densidades de las tres mezclas son de aproximadamente 118 kg/m² de superficie de firme construido (de 5 cm de espesor).
 2. Se ha considerado que la MBC existente inicialmente en la calle Méndez Álvaro está «amortizada ambientalmente», o sea, tiene «carga ambiental nula» al comienzo del proyecto (cuando ha de fresarse para, posteriormente, poder extender las tres mezclas estudiadas).
 3. El RAP necesario para la fabricación de cada una de las RTE se obtiene principalmente del fresado del mismo tramo original de la calle Méndez Álvaro; suponiéndose además que la MBC original tenía las mismas características (naturaleza, espesor, etc.) que la MBC de referencia («alternativa cero») que se va a extender.
 4. Para poder utilizar el RAP procedente del fresado como árido para la fabricación de las mezclas RTE hace falta antes que pase por un proceso de triturado y clasificación en dos tamaños (Grueso: 5/25 y Fino: 0/5). De estos procesos, que se realizan en el emplazamiento donde se sitúan las plantas de fabricación, se obtiene aproximadamente el 50 % (en peso) de ambos tamaños de RAP.

³ RCD: Residuos de Construcción y Demolición.

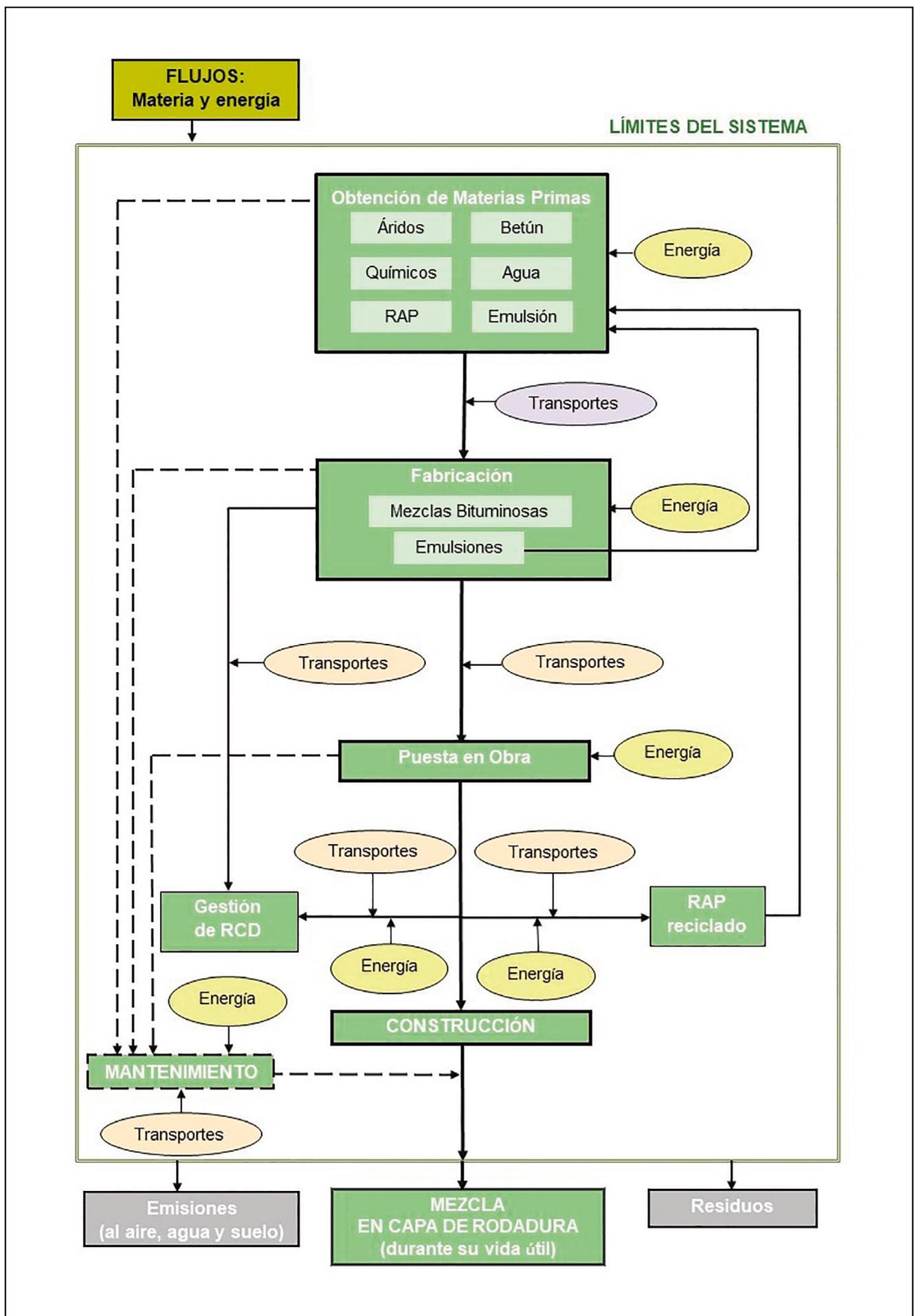


Figura 5. Alcance y límites del sistema de producto (de cada una de las tres mezclas estudiadas).

Dado además que las fórmulas de trabajo de las RTE (tabla 1) exigen un porcentaje superior de RAP grueso que de RAP fino (esta diferencia es mucho mayor en la RTE 100 que en la RTE 70):

- se producen excedentes de RAP fino, y
- se necesita una mayor cantidad de RAP en la RTE 100 que en la RTE 70, tanto porque se utiliza más para su fabricación como porque sobra una cantidad mayor tras el proceso de elaboración de la RTE (y que ha de transportarse a vertedero).

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES MÁS RELEVANTES

Tras la realización de las etapas de Inventario y de Evaluación de Impactos del CV (ICV y EICV, respectivamente) se han obtenido una serie de resultados, los cuales se han analizado e interpretado posteriormente.

3.1. Impactos durante la construcción

Los resultados así como las conclusiones más relevantes que se obtienen de ellos han sido los siguientes:

1. Respecto del consumo de materiales (tabla 2):
Se ha tratado de evaluar los potenciales ahorros en el consumo de materias primas (ligante y áridos naturales principalmente) en las mezclas RTE respecto de la MBC de referencia. En efecto, el uso de materiales secundarios alternativos a los convencionales proporciona soluciones potencialmente «ahorradoras» al utilizar estos materiales como materia prima de fabricación del firme, en lugar de destinarlos a vertedero.

Tabla 2. Porcentaje de variación de los consumos de los principales materiales componentes de las mezclas RTE (respecto de la MBC de referencia)

COMPONENTES DE LAS MEZCLAS	% VARIACIÓN RTE 70/ MBC	% VARIACIÓN RTE 100 / MBC
Ligante	-19,9%	-46,3%
Áridos naturales	-70%	-100%

Tal y como ya se podía suponer de la propia definición de mezclas RTE, para cantidades prácticamente iguales de mezcla, los ahorros de áridos naturales (sustituyéndolos por RAP) son sustanciales (del 100% para el caso de tasa total). Asimismo, también se da un ahorro del contenido de betún dado que se «aprovecha» el betún residual del RAP.

2. Respecto del transporte de materiales (tabla 3):
Reducir las distancias de transporte (en txkm) de los materiales, tanto de las materias primas (desde la cantera a la planta de fabricación) como del «producto» terminado (desde la planta al tajo), reduce el consumo de combustible y, por tanto, de las emi-

siones de los vehículos de transporte. La variable «transporte» puede ser crucial para que una opción se convierta en viable desde el punto de vista ambiental y económico.

Tabla 3. Porcentaje de variación de los transportes de los principales materiales componentes de las mezclas RTE (respecto de la MBC de referencia)

TIPO MEZCLA	MATERIAS PRIMAS (1)	DISTRIBUCIÓN (2)	GESTIÓN DE RCD (3)	TOTAL TRANSPORTE
RTE 70	+2%	≈0%	-66%	-34%
RTE 100	+13%		-42%	-19%

¹ Incluye el transporte de las materias primas (ligante, áridos naturales y el RAP utilizado).

² Las cantidades y las distancias de transporte de las mezclas desde las centrales de fabricación al tajo son prácticamente iguales.

³ Contabiliza el transporte del RAP sobrante (de la cantidad que no se utiliza en la fabricación de la mezcla correspondiente).

Del análisis de la tabla anterior se deduce que:

- a) En el balance general total, se producen porcentajes de ahorro sustanciales en el total de materiales transportados de las mezclas RTE respecto del total de la MBC de referencia; sobre todo para el caso de la RTE 70.
- b) Destacan también de forma relevante los porcentajes de ahorro en el transporte de material RAP sobrante a vertedero, principalmente debido a que las cantidades que se transportan son mucho menores para los casos de las mezclas RTE que para la MBC.

Sin embargo, al contrario de lo que en teoría cabría esperar, el porcentaje de ahorro en estos transportes es mayor en la mezcla RTE 70 (66%) que en la RTE 100 (42%). Ello es debido a que las cantidades de RAP sobrante son mayores para esta segunda mezcla RTE (tal y como se ha explicado en el punto 4 del apartado 2.4).

- c) Los transportes de la fase de obtención de materias primas son ligeramente superiores para las RTE que para la MBC.

En general, la utilización de materiales reciclados en sustitución de áridos naturales suele conllevar una reducción en el transporte (en txkm) e incluso puede llegar a anularse (reciclado *in situ*).

No es éste el caso ya que la mayoría de áridos naturales proceden de una cantera situada a menor distancia de la central de fabricación que de donde procede el RAP. Asimismo, este porcentaje es superior para el caso de la RTE 100 (13%) que para la RTE 70 (2%) ya que las cantidades de RAP transportadas son mayores para el caso de la RTE 100.

3. Respecto de las emisiones de GEI (figuras 6 y 7):
Desde luego, la categoría de impacto que se ha estudiado con mayor grado de detalle es la de «Cambio climático» o «Calentamiento global» ya

que, según lo indicado en la descripción del proyecto, con la aplicación conjunta de estas técnicas de fabricación de RTE a baja temperatura, se espera obtener unas reducciones significativas en las emisiones de GEI:

a) En cuanto al peso que tiene cada fase sobre las emisiones de GEI totales; se obtiene práctica-

mente el mismo orden de impacto de las emisiones de las fases para las tres mezclas (figura 6):

- La fase más influyente es la de obtención de materias primas, seguida de la de gestión de RCD.
- Algo menor suele ser la de transportes de los materiales.

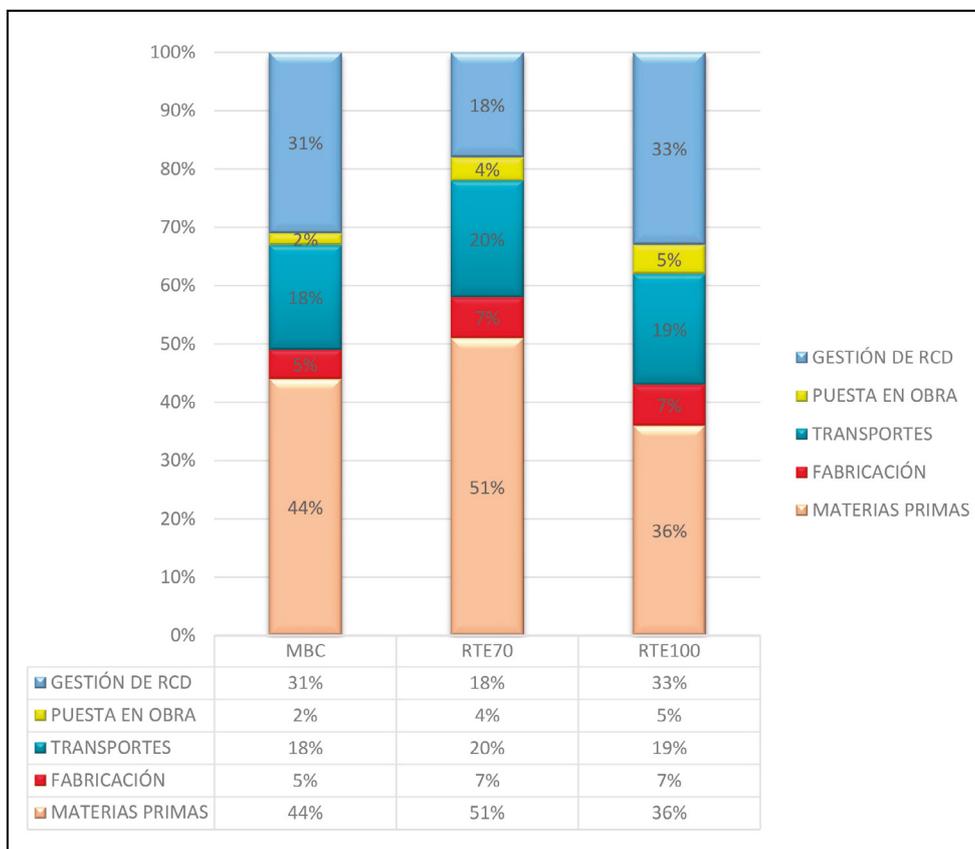


Figura 6. Porcentajes de emisiones de GEI de las tres mezclas estudiadas según cada una de las fases consideradas (respecto de la emisión total de GEI de la misma mezcla).

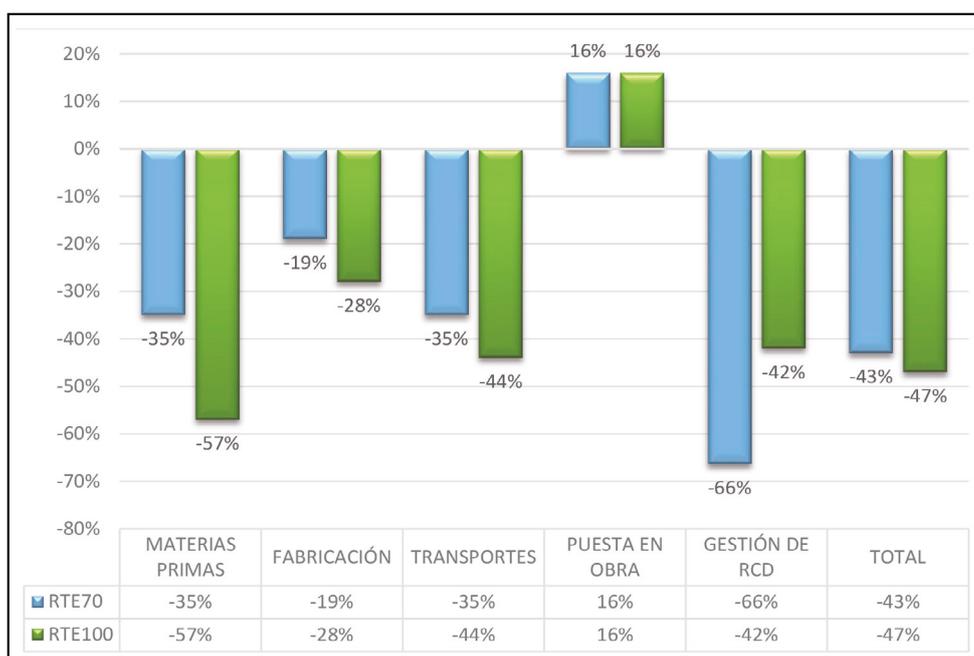


Figura 7. Porcentaje de variación de las emisiones de GEI de cada una de las fases de las mezclas RTE, respecto de su mismo valor en la MBC de referencia.

- Y ya muy por debajo se encuentra la fabricación y, la menos influyente de todas: la puesta en obra.
- b) Referente a las variaciones de las emisiones de GEI entre las mezclas (figura 7):
 Se han analizado las diferencias entre las emisiones de GEI (de cada una de las fases, así como para el total) de las mezclas RTE respecto del valor correspondiente de la emisión en la MBC de referencia, así como la posible asignación de estas variaciones a las distintas técnicas estudiadas en este proyecto (utilización de RAP y fabricación a menor temperatura). Se destaca, como conclusiones más importantes, que:

- Salvo en la fase de puesta en obra, en el resto de las fases, así como en el total de las emisiones, se dan reducciones importantes en las emisiones correspondientes a las mezclas RTE respecto de la MBC de referencia. Además:
 - En el balance general total, se producen porcentajes de ahorro sustanciales en el total de emisiones de GEI de las mezclas RTE respecto del total de la MBC de referencia (43% para la RTE 70 y 47% para la RTE 100); siendo por lo tanto algo mayor para el caso de la RTE 100.
 - En general, las reducciones de las emisiones en todas las fases (así como en el total) son algo mayores para la mezcla RTE 100 que para la RTE 70, excepto para la correspondiente a la gestión de RCD (las canti-

dades de RAP sobrante son mayores para la mezcla RTE 100).

- Tratando de asignar estas variaciones en las emisiones de GEI según las distintas fases a las distintas técnicas estudiadas en este proyecto (utilización de RAP y fabricación a menor temperatura), se puede decir que, por las ventajas anteriormente expuestas, cada una de estas reducciones viene relacionada con la técnica correspondiente según se indica en la tabla 4.
- Se podría decir que las fases con mayor influencia en las reducciones de emisiones de GEI de las mezclas RTE (respecto de la MBC de referencia) son, por orden de mayor a menor, las siguientes:
 - Gestión de RCD.
 - Obtención de materias primas y los transportes de materiales (del mismo orden de magnitud).
 - Fabricación.
 - Por último, muy lejos de las anteriores y suponiendo un aumento de las emisiones de GEI de las RTE respecto de la MBC: la fase de puesta en obra (del orden del 16% de aumento, dado que se han requerido mayores energías de compactación).

4. En cuanto a los impactos en otras categorías:
 Al igual que para las emisiones de GEI correspondientes a la categoría de Cambio Climático, se han obtenido reducciones notables en las dos mezclas RTE (respecto de la MBC de referencia) en todas las

Tabla 4. Fases del CV en las que repercute cada una de las técnicas analizadas, en términos de variación de emisiones de GEI (respecto de la MBC de referencia)

Técnica	Fase en la que repercute	Sentido de la variación ¹	Causas
UTILIZACIÓN DE RAP	MATERIAS PRIMAS		Ahorro de materias primas naturales (sustituyéndolas en todo o en parte por RAP)
	TRANSPORTE MATERIAS PRIMAS ²		En este proyecto ³ , las canteras de áridos naturales están generalmente a menor distancia de la central de fabricación que el emplazamiento de obtención de RAP.
	GESTIÓN DE RCD		Menores cantidades de RAP sobrante.
MEZCLA TEMPLADA	FABRICACIÓN		Menor consumo energético.
	PUESTA EN OBRA		Mayor energía de compactación.

¹ En términos de variación de emisiones de GEI de la RTE (respecto de la MBC de referencia). Una variación de signo negativo se traduce en un ahorro de emisiones (representada por una flecha descendente de color verde).
² La distribución es prácticamente igual para las tres mezclas.
³ Generalmente, suele ocurrir que los emplazamientos de los que se obtiene el RAP se encuentran a menor distancia de la central de fabricación que los de los áridos naturales; reduciendo ello en un ahorro de emisiones de GEI debidas a los transportes.

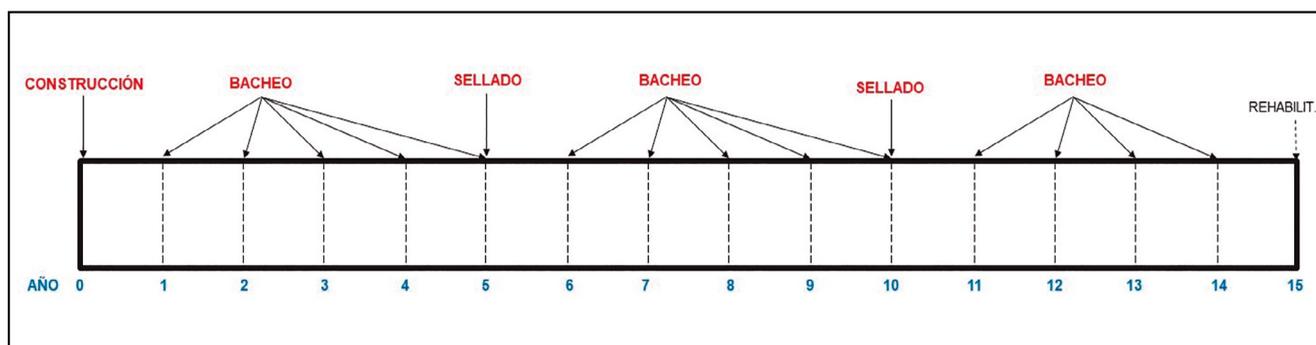


Figura 8. Estrategia de conservación para las mezclas (considerando una vida útil de 15 años).

categorias de impacto consideradas (eutrofización y acidificación, entre otras), siendo generalmente esta reducción ligeramente mayor para el caso de la RTE 100.

3.2. Estimación de la rentabilidad ambiental de las mezclas RTE

Se ha realizado una valoración de la «rentabilidad ambiental» de las dos mezclas RTE mediante la estimación de la durabilidad mínima que habrían de tener las mezclas RTE para «empatar ambientalmente» (en términos de emisiones de GEI) con la de la mezcla MBC de referencia (para la que, según la EAPA⁴, se le supone una vida útil de 15 años).

Para ello, a partir de las prácticas habituales de conservación de este tipo de vías urbanas, se ha considerado una estrategia de conservación teórica para las tres mezclas consistente en dos actuaciones (bacheo y sellado de grietas) aunque estas operaciones se apliquen con una frecuencia distinta dependiendo de la durabilidad que se considere en cada una de las mezclas y supuestos (figura 8).

Con una durabilidad de las RTE superior a la mínima obtenida, estas mezclas serían rentables en términos de emisiones de GEI ya que se conseguirían valores de las emisiones de GEI en un periodo de 15 años inferiores a las de la MBC de referencia (valoradas en este estudio en 11,3 kgCO₂eq/m² de superficie de firme construido, correspondientes a las fases de construcción + mantenimiento)⁵.

Por tanto, a partir de los supuestos y condiciones adoptados para esta estimación, se han obtenido los siguientes resultados teóricos:

- Alrededor de 11,5 años (11,7 y 11,2 años para la RTE 70 y RTE 100, respectivamente) es la durabilidad mínima de la mezclas RTE a partir de la cual resultarían «medioambientalmente rentables» respecto de la MBC (o lo que es lo mismo, el instante en el que se igualan las emisiones totales de GEI de las mezclas RTE con las de la MBC de 15 años de vida útil).

- Esta durabilidad mínima de 11,5 años supone aproximadamente un 75% de la durabilidad adoptada para la MBC de referencia (15 años).

3.3. Conclusiones finales

Ya por último, como conclusión final, cabría decir que, por los resultados obtenidos, la utilización de mezclas RTE en las condiciones establecidas en este estudio podría presentar significativos ahorros ambientales (respecto de la MBC de referencia) en todos los indicadores y categorías estudiados tanto considerando únicamente la fase de construcción («de la cuna a la puerta») como en su conjunto con la fase de mantenimiento adoptada, siempre condicionado a que quede garantizada su durabilidad.

Además, salvo por la «particularidad» que presenta la mezcla RTE 100 (en la que para su fabricación hay que desear mayor cantidad de RAP que para la RTE 70), esta RTE 100 resulta en general ligeramente mejor ambientalmente que la mezcla RTE 70.

Por lo tanto, a través de este estudio de ACV, se han constatado las ventajas medioambientales del uso de estas técnicas que en principio se preveían, cuantificándose éstas además en forma de ahorros de emisiones de GEI, entre otros indicadores.

4. REFERENCIAS

CEDEX (2018). *LIFESURE Deliverable_C2-1 Life Cycle Assessment*. Madrid: CEDEX. Diciembre.

Ramírez et al. (2016). Comunicación 6: Rehabilitación del pavimento de una calle urbana mediante reciclado templado con emulsión bituminosa, a alta tasa y tasa total, aplicado en capa de rodadura e intermedia. *XI Jornada Nacional de ASEFMA*, agosto de 2016.

UNE-EN ISO 14040 (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006)*. Madrid: AENOR. Diciembre.

UNE-EN ISO 14044 (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006)*. Madrid: AENOR. Diciembre.

⁴ EAPA (European Asphalt Pavement Association).

⁵ Según las hipótesis y condiciones establecidas en este estudio de ACV.