

**DESCARBONIZACIÓN EN FIRMES.
EXPERIENCIAS ACTUALES Y POSIBLES
APLICACIONES EN BARCELONA**

DESCARBONIZACIÓN EN FIRMES.
EXPERIENCIAS ACTUALES Y POSIBLES APLICACIONES EN
BARCELONA



**Ajuntament
de Barcelona**

bithabitat



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Grupo de investigación MATCAR
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Barcelona, Diciembre de 2024

TABLA DE CONTENIDO

	Página
1 INTRODUCCIÓN	6
2 EMISIONES DE CO ₂	8
3 EXPERIENCIAS EN ESPAÑA Y EUROPA EN DESCARBONIZACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES DE CALZADAS URBANAS Y ACERAS	19
3.1 Casos en España.....	21
3.1.1 Proyecto Biorepav.....	21
3.1.2 Proyecto Green Asphalt	22
3.1.3 Programa de firmes sostenibles efAPaves y ReCOPAVes de la Dirección General de Carreteras	23
3.1.4 Plan de firmes sostenibles de la Generalitat de Catalunya	25
3.1.5 Planes de acción climática y experiencias del Ayuntamiento de Barcelona 25	
3.2 Casos en Francia.....	28
3.2.1 Tupin-et-Semons. Rhône.....	28
3.2.2 Ravin de Ganay. Aix-en-Provence	29
3.2.3 Rue de la Blanchisserie. Belleville-en-Beaujolais.....	30
4 ACTUACIONES DE DESCARBONIZACIÓN EN LAS UNIDADES DE OBRA EN CALZADAS URBANAS Y ACERAS. FORTALEZAS Y DEBILIDADES	33
5 DETECCIÓN DE RETOS Y LÍNEAS DE INNOVACIÓN. POSIBLES APLICACIONES EN BARCELONA	34
5.1 Actuaciones y retos enfocados en mantener el tipo de sección, cambiando las unidades de obra.....	36
5.2 Actuaciones y retos enfocados en cambiar la sección transversal	40
5.3 Otros retos.....	41
6 REFERENCIAS.....	43

ANEXO 1. Actuaciones de descarbonización en las diferentes unidades de obra.
Fortalezas y debilidades.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evolución de emisiones de GEI en España, en kt CO ₂ eq.....	8
Tabla 2. Contribución de los GEI al total de emisiones brutas en 2022.	9
Tabla 3. Emisiones de CO ₂ eq de las mezclas bituminosas producidas en España.....	14
Tabla 4. Emisiones de mezclas bituminosas producidas en España, en kg CO ₂ eq.	14
Tabla 5. Emisiones de hormigón producido en España, en kg CO ₂ eq.....	18
Tabla 6. Listado de profesionales de ciudades de España y Europa.	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de emisiones de GEI en España (kt de CO ₂ eq).	8
Figura 2. Distribución de emisiones brutas de GEI en España, por gas.....	9
Figura 3. Distribución de emisiones brutas de GEI en España, por sectores.	10
Figura 4. Emisiones relacionadas con el mantenimiento y construcción de carreteras.	10
Figura 5. Emisiones de CO ₂ de la cuna a la puerta (<i>cradle-to-gate</i>) de una mezcla bituminosa típica.....	11
Figura 6. Emisiones GEI de una mezcla bituminosa típica con 5 % de betún.	12
Figura 7. Emisiones de GEI por tonelada de mezcla, de la cuna a la construcción.	12
Figura 8. Distribución de emisiones por tonelada de mezcla bituminosa, de la cuna a la construcción.	13
Figura 9. Distribución de emisiones por tonelada de mezcla bituminosa.....	13
Figura 10. Emisiones de mezclas bituminosas producidas en España.	15
Figura 11. Emisiones para las mezclas producidas en España en fases A1 a A3.....	15
Figura 12. Distribución del destino de residuos de mezclas bituminosas en España.	16
Figura 13. Relación entre la energía y el carbono incorporado en diferentes materiales.	17
Figura 14. Emisiones de hormigón producido en España.....	18
Figura 15. Mezcla BIOPHALT del proyecto BIOREPAV.....	22
Figura 16. Mezcla bituminosa con Green Asphalt®.....	23
Figura 17. Tramo en la Avenida Diagonal (Barcelona) en donde se empleó una mezcla bituminosa con plástico no reciclable.	27
Figura 18. Tramo en calle Josep Soldevila (Sant Andreu, Barcelona) en donde se empleó una mezcla bituminosa con plástico no reciclable y residuos de tinta de tóner de impresora.	27
Figura 19. Rehabilitación de vía Júlia con mezcla bituminosa con árido siderúrgico, adición de polvo de NFVU, sono-reductora.	28
Figura 20. Vía de bicicletas con Bioklair® en Tupin-et-Semons, Rhône, Francia.....	29
Figura 21. Vía con CarbonLight® en Ravin de Ganay, Aix-en-Provence, Francia.....	30
Figura 22. Esquema del sistema ÉcOasis.	31
Figura 23. Captura de parte de la información contenida en el Anexo 1.....	33

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un asunto de interés internacional que se ha venido tratando desde finales de la década de 1970, que en 1992 se formalizó mediante el establecimiento de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y que entró en vigor en 1994. Esta convención ha tomado nota de las diferentes disposiciones de asambleas generales, conferencias, convenciones y protocolos, entre ellos, el Protocolo de Montreal (1987). El objetivo último de esta convención es lograr *“la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.”* [1].

Cada año se reúne la Conferencia de las partes (COP por sus siglas en inglés), órgano supremo de la CMNUCC para examinar y evaluar los efectos de las medidas adoptadas y tomar decisiones para la aplicación efectiva de la convención [2]. De estos acuerdos internacionales, cabe destacar el Protocolo de Kioto, adoptado en 1997 y en vigor desde 2005. Este protocolo compromete a los estados miembros de la convención a limitar las emisiones equivalentes de dióxido de carbono antropogénicas de gases efecto invernadero (GEI), de manera que no excedan las metas individuales acordadas. El objetivo principal era reducir las emisiones totales de estos gases en al menos 5 % en comparación con los niveles de 1990, en el período comprendido entre 2008 y 2012 [3].

Otro acuerdo que cobra relevancia es el Acuerdo de París de la COP21, el cual entró en vigor en 2016. Uno de sus objetivos es *“mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático”*[4]. A su vez, este acuerdo indica que todas las partes deben formular estrategias a largo plazo para un desarrollo con bajas emisiones de GEI; por ello, la Comisión Europea propuso el Reglamento 2018/1999 en el que se establece la necesidad de elaboración de estrategias a largo plazo, al menos de treinta años, para un desarrollo con bajas emisiones por parte de los Estados miembros [5].

Desde la entrada en vigor del Acuerdo de París se han planteado soluciones de bajas emisiones de carbono en las que cada vez más países, regiones, ciudades y empresas

están estableciendo objetivos de neutralidad de carbono y las soluciones de cero emisiones se están volviendo competitivas especialmente en los sectores de energía y transporte[6]. España está alineada con el acuerdo del Consejo Europeo de 2019, de que la Unión Europea (UE) sea climáticamente neutra en el año 2050. Ello también ha quedado manifiesto a nivel nacional con la Declaración de la Emergencia Climática y Ambiental acordada por el Consejo de ministros el 21 de enero de 2020 [5].

Además de lo anterior, en abril de 2022 Barcelona fue escogida por la Comisión Europea para formar parte de la *Misión Europea 100 ciudades inteligentes y climáticamente neutras para el 2030*, con lo cual, existe un fuerte compromiso explícito de la ciudad en la lucha contra el cambio climático [7]. En noviembre de 2024, el Ayuntamiento de Barcelona publicó el documento *Pla Clima: Mesura de Govern*, el cual contiene medidas para la mitigación y adaptación de la ciudad frente al cambio climático, a través de seis (6) ejes de acción o planes: movilidad, transición energética, calor, clima barrios, resiliencia y cambiamos el clima [8].

En concordancia con lo anterior, **Bit Habitat¹**, fundación que impulsa la innovación urbana para dar respuesta a los retos sociales, económicos, tecnológicos y ambientales en Barcelona, ha contratado a la **Universidad Politécnica de Cataluña²** a través del grupo de investigación **Materiales de construcción y carreteras - MATCAR³**, una asistencia técnica para la elaboración de un estudio del estado del arte de la descarbonización en firmes y sus posibles aplicaciones en Barcelona.

El objetivo de este documento es presentar de manera resumida la recopilación de información de tecnologías de materiales o prácticas constructivas que favorezcan la descarbonización en las capas de firmes de calzada y aceras, así como revisar las fortalezas y debilidades de las diferentes tecnologías y recopilar experiencias en España y otros países para evaluar su potencial de aplicación en la ciudad de Barcelona.

¹ <https://bithabitat.barcelona/es/>

² <https://www.upc.edu/ca>

³ <https://futur.upc.edu/MATCAR>

2 EMISIONES DE CO₂

La huella de carbono es el indicador ambiental de las emisiones directas e indirectas de los gases efecto invernadero (GEI) liberadas a la atmósfera y su unidad de medida universal, que indica el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), se expresa en masa de CO₂ [9].

En lo que respecta a las emisiones totales de GEI en España, en el año 2022 éstas fueron de 294.201,4 kilotoneladas de CO₂ equivalente (kt de CO₂ eq), lo cual representa un aumento del 2,0 % respecto al año 2021 y un incremento del 2,4 % respecto al año base (1990). La evolución de las emisiones brutas y netas en España se presentan en la Tabla 1 y en la Figura 1.

Tabla 1. Evolución de emisiones de GEI en España, en kt CO₂ eq.

Descripción	1990	2005	2010	2015	2019	2020	2021	2022
Emisiones brutas (sin incluir LULUCF)	287.286	437.749	354.497	333.190	309.582	270.668	288.508	294.201
Variación en % vs. 1990	100 %	152,4 %	123,4 %	116,0 %	107,8 %	94,2 %	100,4 %	102,4 %
Emisiones netas (incluyendo LULUCF)	253.393	391.729	308.635	286.832	262.594	224.194	240.992	246.784
Variación en % vs. 1990	100 %	154,6 %	121,8 %	113,2 %	103,6 %	88,5 %	95,1 %	97,4 %

LULUCF: Sector Uso de la tierra, cambios del uso de la tierra y selvicultura, por sus siglas en inglés

Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados de [7].

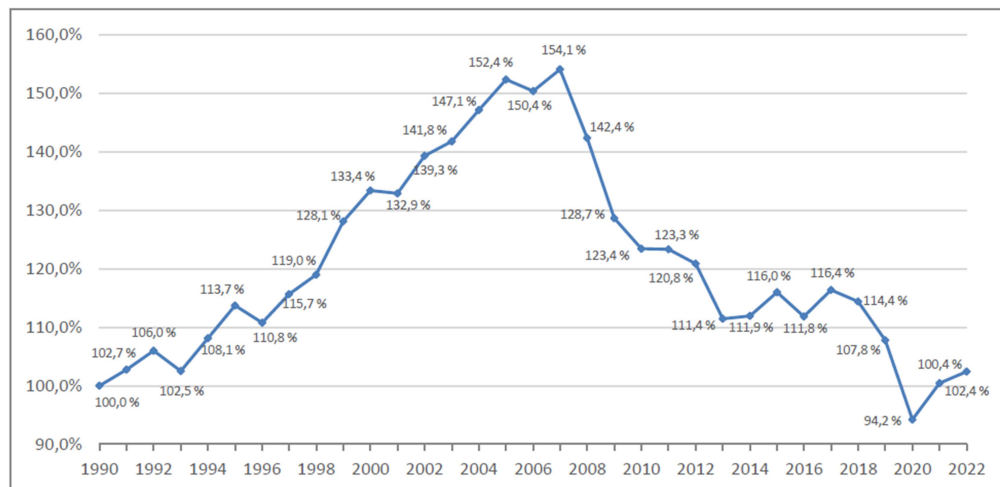


Figura 1. Evolución de emisiones de GEI en España (kt de CO₂ eq).

Fuente: Informe de Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero [7].

En cuanto a la distribución por gases de la emisión total de GEI se tiene que el 79,8 % corresponde a dióxido de carbono (CO₂), seguido del 14,4 % de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) 3,95 % y en menor cantidad, hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Tabla 2 y Figura 2); por ello, los mayores esfuerzos en políticas ambientales y las tecnologías probadas de planes y hojas de ruta de diversas ciudades se enfocan principalmente en la reducción de CO₂.

Tabla 2. Contribución de los GEI al total de emisiones brutas en 2022.

GEI	Porcentaje de gas en masa respecto al total del inventario	% de CO ₂ eq respecto al total del inventario
CO ₂	99,34 %	79,76 %
CH ₄	0,64 %	14,43 %
N ₂ O	0,02 %	3,95 %
HFC y PFC	0,001452 %	1,78 %
SF ₆	0,000004 %	0,08 %

Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados de [7].

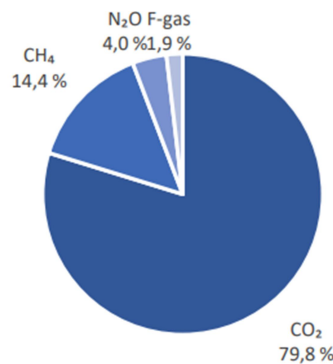


Figura 2. Distribución de emisiones brutas de GEI en España, por gas.

Fuente: Informe de Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero [7].

Según el Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España [7], las contribuciones porcentuales a las emisiones totales de CO₂ eq del total del inventario por sectores, para el año 2022, se dividen en: 75,5 % sector energía, 7,7 % sector industrial y uso de productos, 11,9 % sector agrícola y 5 % sector residuos. Los subsectores con más peso en el global de emisiones brutas de GEI en 2022 son, por una parte, el transporte (30,7 %), seguido de las actividades industriales (18,4 %), la generación de electricidad (14,5 %), sector agricultura y ganadería (11,9 %), el consumo en el sector residencial, comercial e institucional (8,3 %) y los residuos (5 %) (Figura 3). Según la EAPA⁴, en Europa las carreteras soportan el 81 % del transporte de pasajeros y el 73 % del transporte interno de mercancías.

⁴ EAPA: European Asphalt Pavement Association

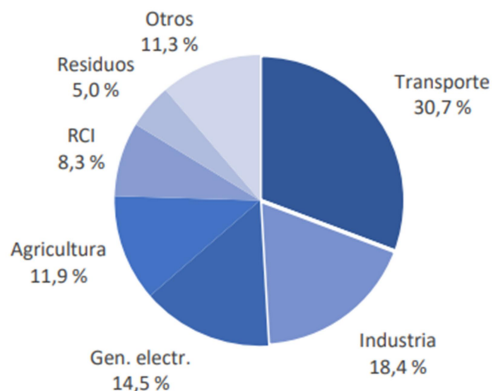


Figura 3. Distribución de emisiones brutas de GEI en España, por sectores.

Fuente: Informe de Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero [7].

En lo que respecta a la industria de la construcción, se han cuantificado las emisiones de diferentes materiales y actividades; por ejemplo, la autoridad de la red de carreteras del Reino Unido en el año 2020 presentaba los valores de emisiones de cada material empleado en la construcción y mantenimiento de carreteras que se observan en la Figura 4; en función de esto, han centrado sus objetivos de descarbonización de este sector para el año 2040 en las mezclas bituminosas, el acero, el cemento y el hormigón, que en este caso, representan el 47 % del mantenimiento y construcción de carreteras [12].

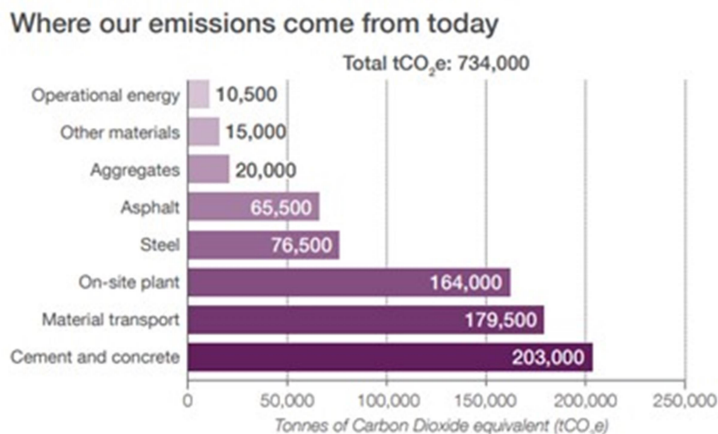


Figura 4. Emisiones relacionadas con el mantenimiento y construcción de carreteras.

Fuente: National Highways. Net zero highways: our 2030/2040/2050 plan. 2021 [12].

Merece la pena destacar que, del total de emisiones brutas en España del año 2022, 294.201 kt CO₂ eq (Tabla 1), aproximadamente el 8 % es atribuido al Sector 2 – *Procesos industriales y usos de productos*, que emitió 22.550 kt CO₂ eq. Dentro de éste, el subsector que más contribuye es el de *Productos minerales*, con 10.285 kt CO₂ eq (46

%). A su vez, dentro de este subsector, la tendencia de las emisiones está claramente marcada por la producción de clínker, que contribuye con más del 40 % [7]. Por lo anterior, algunas de las propuestas de actuación que se presentan en el Capítulo 5 de este documento, están enfocadas en emplear hormigones con cementos activados alcalinamente o con cementos con mayor cantidad de aditivos (*blended cements*), o bien, optimizar el contenido de cemento en el diseño de mezclas de hormigón.

Otro dato para destacar es que más del 90 % de las carreteras en Europa tiene una capa de rodadura bituminosa, por lo cual, esta industria tiene el potencial de convertirse en una herramienta clave en la descarbonización [11].

En lo que respecta a las mezclas bituminosas, las emisiones de CO₂ se producen durante cada etapa del ciclo de vida: suministro de materias primas (A1), transporte a fábrica (A2), fabricación (A3), transporte a obra (A4), instalación (A5), uso / mantenimiento / rehabilitación (B1 a B7) y fin de su vida (C1 a C4), así como el potencial de reutilización o reciclaje (D). Sin embargo, la mayor contribución se encuentra en la fase de producción (A1-A3), conocida también como “de la cuna a la puerta” (*cradle-to-gate*). Según información publicada en EEUU por la NAPA⁵, tomando como escenario de referencia una mezcla bituminosa con un contenido de betún del 5 %, producida en una planta típica que emplea gas natural como combustible y con una distancia de transporte de áridos de 21,5 millas, las emisiones totales son 53,7 kg CO₂ eq/t de mezcla, de los cuales, 57 % corresponden a la obtención de materias primas (A1), 5 % al transporte (A2) y 38 % a la fabricación de la mezcla (A3), tal como se presenta en la Figura 5 [13].

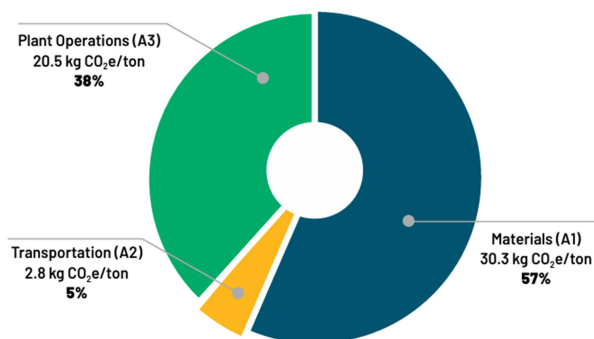


Figura 5. Emisiones de CO₂ de la cuna a la puerta (*cradle-to-gate*) de una mezcla bituminosa típica.

Fuente: NAPA. The Carbonfootprint of Asphalt Pavements. 2024 [13].

En este mismo escenario de referencia, es interesante observar que el betún presenta una mayor huella de carbono (94 %) en comparación con los áridos (6 %), aun cuando

⁵ NAPA: National Asphalt Pavement Association

la proporción de la mezcla bituminosa de referencia es 5 % de betún y 95 % de áridos (Figura 6). Asimismo, el betún representa el 53 % de las emisiones en las etapas A1, A2 y A3 de la cuna a la puerta (*cradle-to-gate*) [13].

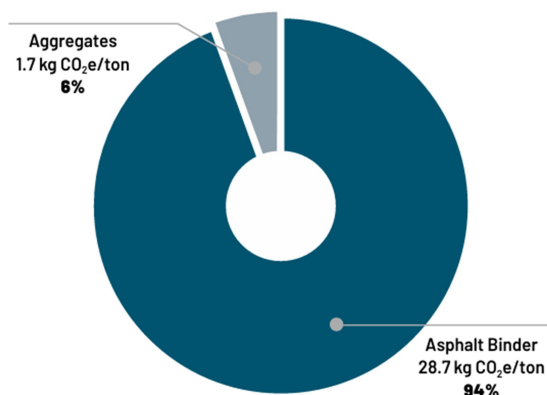


Figura 6. Emisiones GEI de una mezcla bituminosa típica con 5 % de betún.

Fuente: NAPA. The carbonfootprint of asphalt pavements. 2024 [13].

Uno de los proyectos que ha publicado información referente a emisiones de mezclas bituminosas en España es LIFE BATTLE CO₂, financiado por la Unión Europea y coordinado por la Fundación Cartif. En este proyecto se estudió la incorporación de biomasa en el proceso de fabricación de mezclas bituminosas y se validó una mezcla innovadora en un tramo real de carretera. De acuerdo con el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) realizado, desde la obtención de las materias primas hasta la puesta en obra de la mezcla bituminosa (A1 a A3), las emisiones por cada tonelada de mezcla bituminosa son de 62 kg CO₂ eq (Figura 7), donde el 49 % de las emisiones de GEI se producen en el proceso de fabricación (Figura 8) [14].

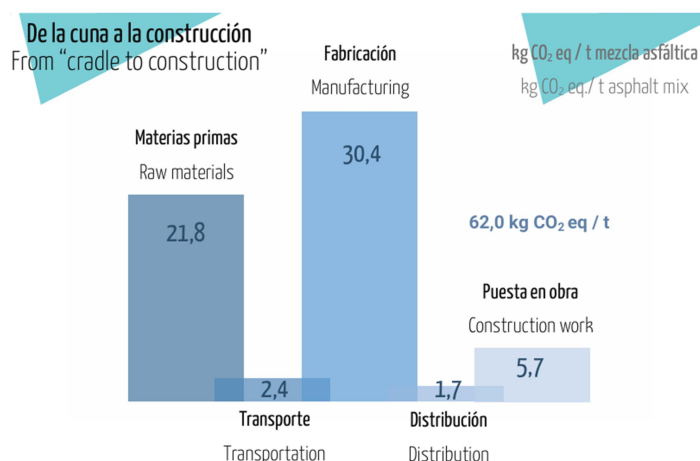


Figura 7. Emisiones de GEI por tonelada de mezcla, de la cuna a la construcción.

Fuente: European Project LIFE. Manual de buenas prácticas y principales resultados. Best practices manual and main results [14].

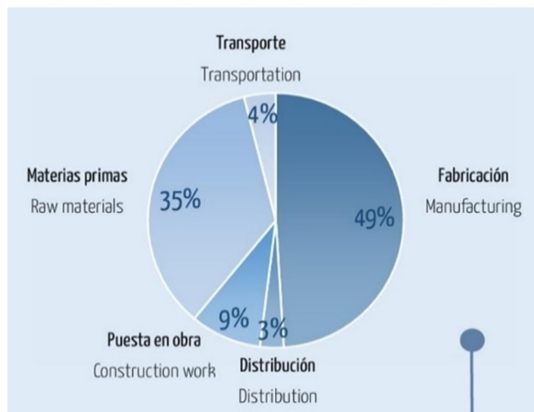


Figura 8. Distribución de emisiones por tonelada de mezcla bituminosa, de la cuna a la construcción.

Fuente: European Project LIFE. Manual de buenas prácticas y principales resultados. Best practices manual and main results [14].

En este proyecto determinaron que el proceso de calentamiento de áridos mediante el uso de combustible fósil conlleva unas emisiones de CO₂ del 75-80 % aproximadamente. Esta es una etapa crítica en el proceso de fabricación de mezclas bituminosas, que, junto al calentamiento del betún, representan alrededor del 90 % de las emisiones de CO₂ generadas en la planta [14].

De manera similar, en 2022 la EPA envió una encuesta a todos sus miembros para que indicaran cuál es la mezcla bituminosa representativa de cada país, incluyendo aspectos de su producción y puesta en obra. A partir de esta información, se obtuvo que las emisiones de una (1) tonelada de mezcla bituminosa durante todo su ciclo de vida son 65 kg CO₂ eq, de los cuales, 53 kg CO₂ eq, es decir, más del 80 % corresponden a las etapas A1 a A3 (*cradle-to-gate*) (Figura 9).

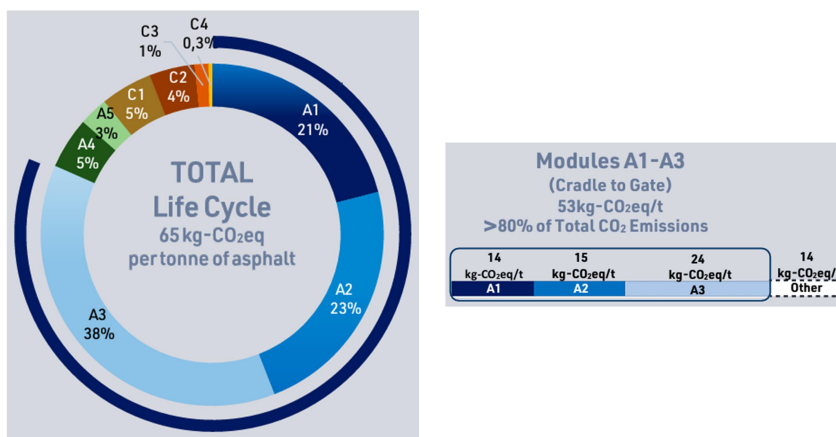


Figura 9. Distribución de emisiones por tonelada de mezcla bituminosa.

Fuente: EAPA. Towards Net Zero. A Decarbonisation Roadmap for the Asphalt Industry [11].

La Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA) ha publicado en su sitio web que la producción de mezclas bituminosas en España en 2022 fue de 17,1 millones de toneladas. La producción por tipo de mezcla y las emisiones asociadas se detallan en la Tabla 3 [15][16][17].

Tabla 3. Emisiones de CO₂ eq de las mezclas bituminosas producidas en España.

Tipo mezcla	Porcentaje producción (%)	Emisiones (kg CO ₂ eq/t)	Emisiones (kg CO ₂ eq/m ²)	Vida útil prevista (años)
AC	88,27	60,7	5,7	14
BBTM	7,6	79,66	5,1	12
PA	0,74	70,15	5,5	10
SMA	2,71	86,57	6,1	20

Fuente: Elaboración propia a partir de información de ASEFMA [15][16].

ASEFMA ha publicado la Declaración Ambiental de Producto (DAP) de las mezclas bituminosas que se producen en España para diferentes etapas o módulos: módulo de la producción de materias primas, transporte en producción y fabricación (A1, A2 y A3), módulo de deconstrucción/demolición, transporte de residuos, tratamiento y eliminación de residuos (C1, C2, C3 y C4) y módulo de beneficios, es decir, el potencial de reutilización y reciclaje (D); los resultados expresados como Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) cuyas unidades, se resumen en la Tabla 4 y Figura 10. Las emisiones de una (1) tonelada de mezcla a partir del promedio ponderado de los cuatro tipos de mezcla producidas en España en las etapas A1 a A3 es de 62,6 kg CO₂ eq (Figura 11).

Tabla 4. Emisiones de mezclas bituminosas producidas en España, en kg CO₂ eq.

Etapa ciclo de vida	Módulo	Tipo de mezcla bituminosa			
		AC	BBTM	PA	SMA
Suministro de materias primas	A1	32,30	45,10	38,10	50,40
Transporte	A2	7,42	12,70	11,20	15,30
Fabricación	A3	20,90	20,90	20,90	20,90
Subtotal A1-A3		60,62	78,70	70,20	86,60
Deconstrucción	C1	0,75	0,75	0,75	0,75
Demolición	C2	7,64	7,64	7,64	7,64
Tratamiento de residuos	C3	0,14	0,14	0,14	0,14
Eliminación de residuos	C4	2,10	2,10	2,10	2,10
Potencial de reutilización, recuperación y reciclaje	D	-15,70	-19,20	-16,60	-22,90

Fuente: Elaboración propia a partir de información de datos de ASEFMA [18][19][20][21].

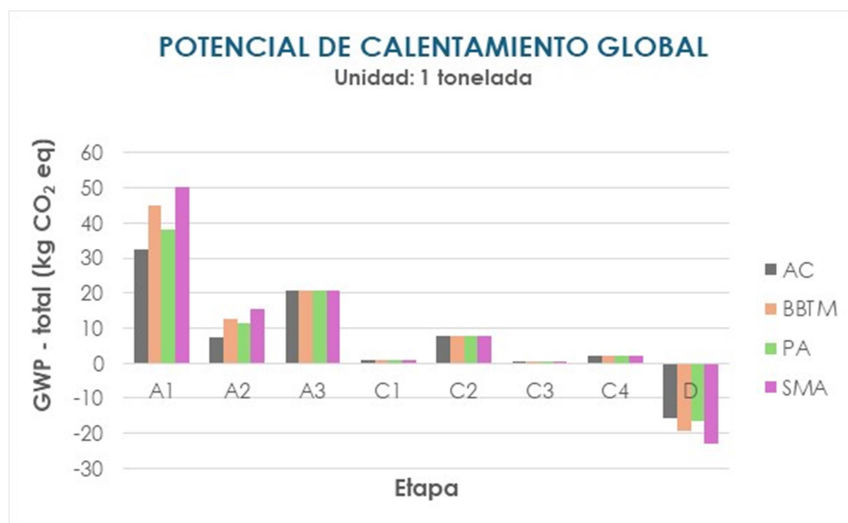


Figura 10. Emisiones de mezclas bituminosas producidas en España.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de datos de ASEFMA [18][19][20][21].

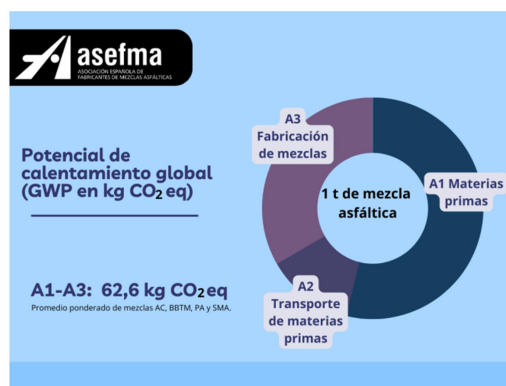


Figura 11. Emisiones para las mezclas producidas en España en fases A1 a A3.
Fuente: ASEFMA. Declaraciones ambientales de producto de mezclas bituminosas [23].

De los módulos de tratamiento y eliminación de residuos, ASEFMA señala que el 53,5 % se procesa en planta para la obtención de material secundario en la fabricación de nuevas mezclas, el 27,0 % se emplea como árido o similar y el 19,5 % del producto retirado, se envía a eliminación en vertedero (Figura 12).

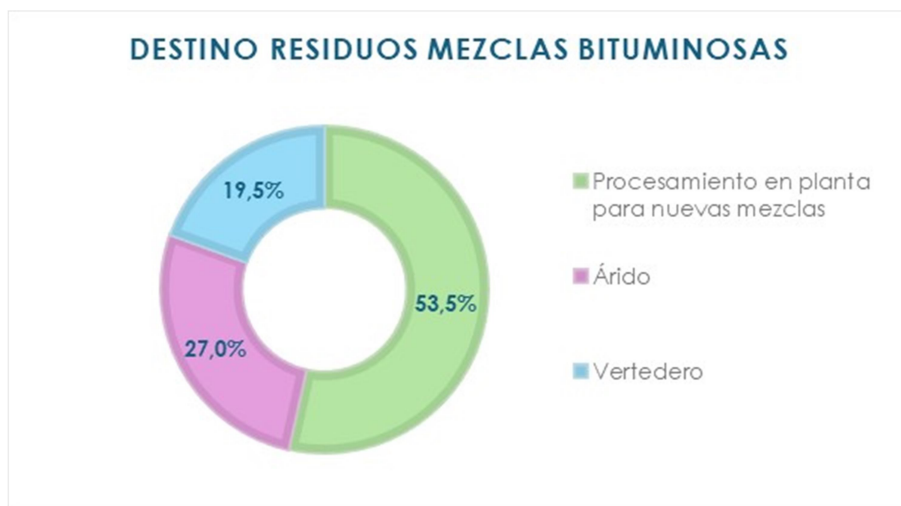


Figura 12. Distribución del destino de residuos de mezclas bituminosas en España.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AENOR-ASEFMA [18].

El empleo de material proveniente del fresado de mezclas bituminosas (en adelante, RA) puede reducir significativamente las emisiones de gases efecto invernadero en los módulos A1 a A3, de la cuna a la puerta (*cradle-to-gate*). Según información publicada en EEUU por la NAPA, incorporar 20 % o 50 % de RA en una mezcla bituminosa reduce las emisiones de la cuna a la puerta (A1-A3) en 12 % y 29 %, respectivamente, en comparación con una mezcla sin inclusión de RA [13].

De acuerdo con los resultados de emisiones de mezclas bituminosas, publicados por diferentes países, es indiscutible que los esfuerzos por reducir emisiones se enfoquen en actuaciones relacionadas con reducir temperaturas de fabricación de mezclas, incorporar material proveniente del fresado (RA), incorporar residuos y emplear ligantes que sustituyan parcial o totalmente el betún de origen fósil.

Es frecuente que un único ingrediente o proceso domine las emisiones de GEI de la cuna a la puerta (*cradle-to-gate*). Por ejemplo, según la Asociación del Cemento de Canadá, el cemento representa en torno al 85 % de la huella de carbono de una mezcla de hormigón, a pesar de que sólo representa entre el 10 y el 15 % (en peso) de la mezcla [13]. De manera similar, en EEUU las emisiones de la cuna a la puerta de la producción del hormigón son aproximadamente 460 kg CO₂ eq/yard³, de los cuales, 400 kg CO₂ eq/yard³ se asocian con la obtención del cemento. En el proceso de fabricación del hormigón, aproximadamente el 1,5 % se atribuye a la adquisición y procesamiento de materias primas, el 89 % a la fabricación del cemento (de los cuales, el 46 % es resultante de la calcinación de la caliza) y el 9,5 % a la fabricación del hormigón. En promedio, en EEUU se emiten 922 kg CO₂ eq por cada tonelada de cemento producida [24]. Según información de España, de las emisiones de la fabricación del cemento, el 60 % corresponde a la descarbonatación de la materia prima (caliza) en

la producción de clínker ($\text{CO}_3\text{Ca} = \text{CaO} + \text{CO}_2$) y el 40 % al uso de combustibles fósiles en los hornos de fabricación de clínker [25]. Además, este proceso requiere un elevado consumo de recursos naturales y de energía térmica (3600 MJ/tonelada de clínker), esta última debida a las altas temperaturas de elaboración del clínker (1400-1500 °C) [27].

En el 2022, en EEUU se fabricaron 92 millones de toneladas, que se asocian con el 1 % de las emisiones de GEI en ese país y entre el 5 % - 8 % de las emisiones de GEI globales. Asimismo, cobra relevancia hacer énfasis en la reducción de emisiones en la producción del cemento y del hormigón, ya que este último es considerado como el segundo material más empleado, después del agua (2 yd³/persona/año) [24]. En la Figura 13 se presenta una gráfica que enseña la relación entre el carbono incorporado y la energía incorporada de diferentes materiales empleados en la industria de la construcción.

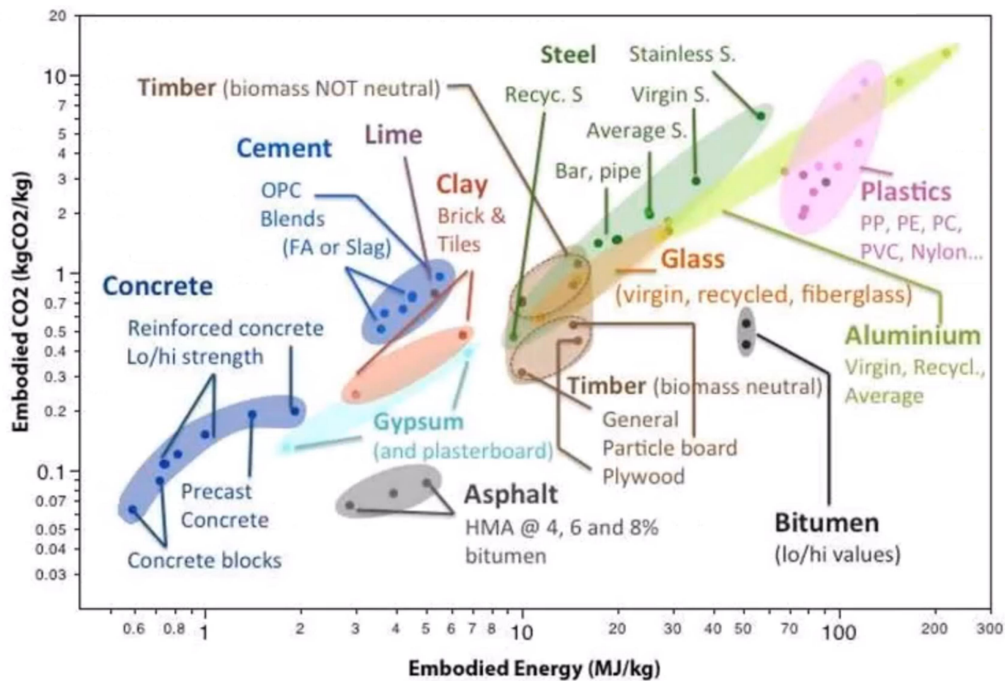


Figura 13. Relación entre la energía y el carbono incorporado en diferentes materiales.
Fuente: [24].

En lo correspondiente a las emisiones a nivel nacional, la Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP) en el año 2022 presentó la Declaración Ambiental del Producto de hormigones, basada en un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la cuna a la puerta (A1-A4). Para el caso de hormigones de clase resistente (fck) menores o iguales a 25 MPa u hormigones por dosificación con contenidos de cemento menores o iguales de 300 kg/m³, que es la categoría a la que

pertenecen los hormigones empleados en infraestructura vial, las emisiones reportadas como Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) son las que se presentan en la Tabla 5 y Figura 14.

Tabla 5. Emisiones de hormigón producido en España, en kg CO₂ eq.

Etapa ciclo de vida	Módulo	Emisiones de hormigones fck ≤ 25 MPa o con cemento ≤ de 300 kg/m ³ (kg CO ₂ eq)
Producción de materias primas	A1	214,00
Transporte	A2	7,22
Fabricación	A3	2,61
Subtotal A1-A3		224
Transporte y proceso de construcción	A4	14,30
Subtotal A1-A4		238

Fuente: Elaboración propia a partir de información de datos de ANEFHOP [28].

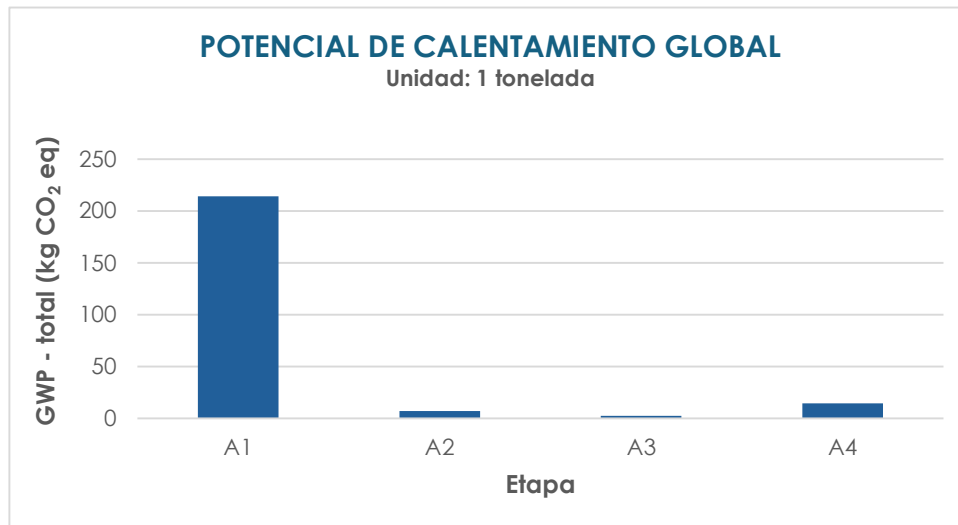


Figura 14. Emisiones de hormigón producido en España

Fuente: Elaboración propia a partir de información de datos de ANEFHOP [28].

3 EXPERIENCIAS EN ESPAÑA Y EUROPA EN DESCARBONIZACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES DE CALZADAS URBANAS Y ACERAS

Uno de los objetivos del presente contrato consistió en investigar experiencias de materiales y tecnologías que se hayan probado en tramos piloto o que se hayan empleado en tramos viales en servicio, en otras ciudades y países de Europa. Para ello, se contactó con encargados entidades públicas del sector vial y del espacio público, así como profesionales de empresas privadas tanto del sector de la construcción como del diseño y consultoría. En la Tabla 6 se presenta el listado de los profesionales contactados.

Tabla 6. Listado de profesionales de ciudades de España y Europa.

Nombre	Función / Área	Sector / País
Ferran Camps	Subdirector General de Descarbonització i Carreteres Intel·ligents	Generalitat de Catalunya
Álvaro Navareño	Director Técnico de la Dirección General de Carreteras	Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible
Pablo de Tarso Boix	Jefe del Servicio de construcción	Valencia
Jordi Esparza Soria	Jefe del servicio territorial de conservación y construcción	Generalitat de Valencia
Emilio Martínez Herranz	Subdirector General de Apoyo Técnico, Innovación y Sostenibilidad	Ayuntamiento de Madrid
Anna París	Parma	España
José Rebollo	Pentaedro	España
Mar Subarroca	Sorigué	España
Alfredo Bobis	Sorigué	España
Josep Ramon Escur	Agustí y Masoliver	España
Víctor Ramon	Agustí y Masoliver	España
Miguel Angel Mateos	ELSAN / OHLA	España
Javier Serrano Plaza	ELSAN / OHLA	España
Joan Roselló	ELSAN / OHLA	España
María Elena Hidalgo	Eiffage	España
Julien VAN ROMPU	Eiffage	Francia
Francois OLARD	Eiffage	Francia
Aurelie LE MOIGNE	Eiffage	Francia
Christophe PENNONT	Eiffage	Francia

Nombre	Función / Área	Sector / País
Perrine PRIGENT	Deputy Mayor of Marseille	Marseille
Candice MERCIER	Aménagement de l'espace public	Marseille
Catherine LAURANSON	Chargée de Mission Transition écologique	Marseille
Gareth Jones	Cardiff City Council (Wales)	Wales
Colette LEYGNAC	Espace Public	Strasbourg
Daniel SAINT-PIERRE	Voirie	Strasbourg
Francis CHOBEAUX	Espace Public / Voirie	Paris
Martine GERARD	Responsable achats	Paris
Claire BETHIER	Direction Espaces Publics	Lille
Marc FASQUELLE	Chef du service branchement	Lille
Sylvain ANDRÉ	Direction Voirie - Espaces Publics	Rennes
Cédric DURAND	Direction Voirie - Espaces Publics	Le Havre
Carmen MILATA	Direction Espaces Publics	Orléans
Frédéric BERTHOU	Voirie	Orléans
Pascal LE ROUX	Division opérationnelle VOIRIE	Brest
Harry PETITDEMANGE	Chef de service - BE Espaces Publics	Troyes
Franck FURET	Voirie	Poitiers
Pierre CORNIQUEL	Direction Voirie - Espaces Publics	Caen
Serge FORESTI	Directeur de la Direction des Espaces publics et naturels	Strasbourg
Jean-Baptiste CHARROIS	Chef de service - BE Espaces Publics	Nancy
Philippe BOUCHARD	Chef de service - BE Espaces Publics	Tours
Vincent MAILLARD	Direction Voirie - Espaces Publics	Tours
Jame VOTANSON	Adjoint direction voirie	Saint Étienne
BUGNAZET Clémentine	DIRECTION RÉGIE	Lyon
Nicolas DUBOIS	Responsable voirie	Montpellier
Richard SOLER	Responsable voirie	Avignon
Mikael BALIN	Responsable voirie	Toulon
Eric FABRE	Chef Service Exploitation des Routes	Nice
Fabrice LANDREAU	Responsable magasin	Bordeaux
Guilhem GASTON	Responsable voirie	Perpignan
Meriem TOZY	Assistante du Directeur Général	Maroc
Tayeb OUBOULAL	Service Achats	Maroc

Nombre	Función / Área	Sector / País
Ilaria Giuliani	Directora de Resiliencia Urbana	Milán, Italia

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan algunas experiencias llevadas a cabo en calzadas y aceras de algunas ciudades europeas.

3.1 Casos en España

3.1.1 Proyecto Biorepav

El proyecto de economía circular Biorepav, de resolución EMC/1653/2020, con la participación de la Generalitat de Catalunya, la Agencia para la competitividad de las empresas (ACCIÓ), la Agencia de Residuos de Catalunya (ARC) y la empresa Eiffage consistió en investigar y desarrollar la metodología de la aplicación de biomateriales procedentes de biomasa en la reutilización y reciclado de pavimentos asfálticos; específicamente se estudió la viabilidad técnica y económica del uso de un aditivo de origen vegetal como rejuvenecedor del betún oxidado en múltiples etapas de reciclado, incorporando altas tasas de RA.

La mezcla denominada BIOPHALT®, desarrollada por Eiffage consistió en una mezcla bituminosa con un 40 % de RA y 100 % de bioligante BIOPHALT 193® que contiene un 92 % de materia vegetal procedente de la silvicultura. La temperatura de fabricación fue 135 °C.

Un tramo de prueba a escala real de 500 m de longitud se localizó en la carretera T-240, en La Bisbal del Penedés, Tarragona. De éstos, 300 m se pavimentaron con esta mezcla innovadora y sostenible tipo AC16 surf S, y los 200 m restantes con una mezcla convencional tipo AC16 surf S.

Dentro de los resultados cabe destacar que las emisiones con la mezcla convencional fueron de 51,13 kg CO₂ eq/t de mezcla extendida y las emisiones de la mezcla Biophalt® fueron -13,80 kg CO₂ eq/t, es decir, la reducción fue del 127 %. Por otra parte, con la mezcla convencional las emisiones fueron de 6,14 kg CO₂ eq/m² de firme, mientras que para la mezcla Biophalt® fueron de -1,66 kgCO₂ eq/m². En definitiva, las emisiones GEI evitadas fueron de 19,48 t CO₂ eq y fue una obra neutra en carbono [25].



Figura 15. Mezcla BIOPHALT del proyecto BIOREPAV.

Fuente: [25]

3.1.2 Proyecto Green Asphalt

El proyecto Green Asphalt contó con la participación de la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía (IDEA), la Universidad de Huelva y la empresa Eiffage. Consistió en estudiar el uso de residuos como aditivos para ligantes bituminosos y el uso de ligninas para aplicación en betunes y bioligantes.

La mezcla desarrollada por Eiffage consistió en una mezcla bituminosa con un 30 % de RA y 100 % de bioligante GREEN ASPHALT® que contiene un 80 % de materia vegetal y 20 % de polvo de caucho aportado por vía seca. La temperatura de fabricación fue 135 °C.

Un tramo de prueba a escala real de 400 m de longitud se localizó en la carretera A-477, en Gerena, Sevilla; 250 m fueron con mezcla AC16 surf S innovadora sostenible y 150 m mezcla AC16 surf S convencional.

Dentro de los resultados cabe destacar que las emisiones con la mezcla convencional fueron de 47,52 kg CO₂ eq/t de mezcla extendida y las emisiones de la mezcla con Green Asphalt® fueron 7,62 kg CO₂ eq/t, es decir, la reducción fue del 84 %. Otro dato relevante es que con la mezcla convencional las emisiones fueron de 5,70 kg CO₂ eq/m² de firme, mientras que para la mezcla con Green Asphalt® fueron de 0,91 kg CO₂ eq/m². En definitiva, las emisiones GEI evitadas en la obra fueron de 9,98 t CO₂ eq [25].

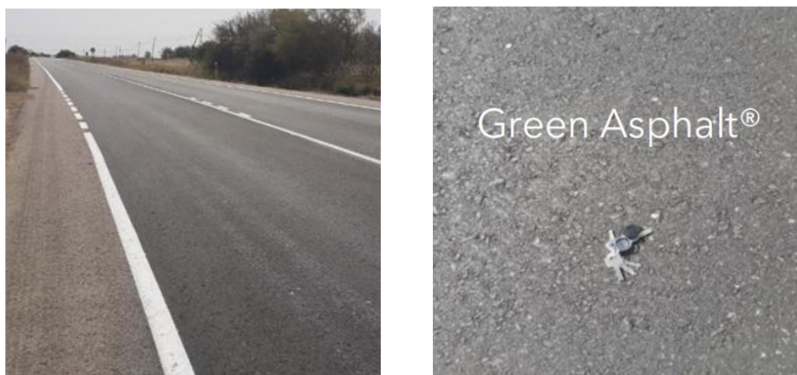


Figura 16. Mezcla bituminosa con Green Asphalt®.

Fuente: [25]

3.1.3 Programa de firmes sostenibles efAPaves y ReCOPaves de la Dirección General de Carreteras

La Dirección General de Carreteras (DGC) del Ministerio de transportes y movilidad sostenible, durante el año 2022 definió diez (10) retos para encontrar soluciones innovadoras para las fases de planificación, construcción, conservación y seguridad vial en la Red de Carreteras de del Estado (RCE). A partir de las 556 propuestas recibidas, la DGC ha configurado dos (2) Programas de Compra Pública de Innovación de firmes sostenibles: efAPaves y ReCOPaves. A continuación, se resumen las actuaciones de estos dos programas [25]:

- **efAPaves (Efficient Asphalt Pavements):** Incluye trece (13) actuaciones en diferentes tramos de la RCE para llevar a cabo la rehabilitación de firmes con procedimientos sostenibles, a través de los siguientes impactos:
 - Potenciar la economía circular y reducir el consumo de recursos naturales, mediante la reutilización de tasas incrementales de RA y adición de residuos.
 - Mejorar la eficiencia energética de los procesos de fabricación a partir de la reducción de temperaturas (mezclas bituminosas semicalientes y templadas en planta, o en frío *in situ*).
 - Reducir las necesidades de acarreo de materiales empleando técnicas de reutilización *in situ*.

En estas actuaciones se aplicará alguna de las siguientes técnicas, según las solicitudes de tráfico, climatología y demás condiciones de contorno del proyecto:

- Reutilización de mezclas bituminosas en caliente o semicaliente en central.
- Fabricación de mezclas bituminosas templadas, en central, con emulsión o betún espumado.

- Reutilización de firmes *in situ* a temperatura ambiente, con emulsión o betún espumado.
- **ReCOPaves (Reduced CO₂ Pavements):** Contempla nueve (9) actuaciones en diversos tramos de la RCE en Andalucía, con soluciones innovadoras que exceden el marco normativo y en donde se pretende cumplir con los siguientes objetivos:
- Potenciar la economía circular y reducir el consumo de recursos naturales, mediante la optimización de espesores, la reutilización de tasas incrementadas de RA o la adición de residuos procedentes de otras industrias, por ejemplo, polvo de caucho de neumáticos fuera de su vida útil (NFVU).
 - Mejorar la durabilidad y prestaciones de los firmes, reduciendo su frecuencia de rehabilitación, garantizando las condiciones de seguridad y comodidad, por ejemplo, mediante el empleo de mezclas bituminosas con adiciones de grafito.
 - Mejorar la eficiencia energética y reducir la huella de carbono a partir del empleo de mezclas bituminosas semicalientes y templadas y favoreciendo la reutilización *in situ*.
 - Sustituir materiales procedentes de fuentes fósiles por otros procedentes de fuentes renovables, por ejemplo, el uso de bioligantes como sustitución del betún proveniente de la destilación del petróleo.

En estas actuaciones se aplicará alguna de las siguientes soluciones:

- Mezclas sostenibles de altas prestaciones tipo SMA con adición de polvo de caucho NFVU, fabricadas a menor temperatura (semicalientes) e incorporando material proveniente del fresado (RA).
- Reutilización en caliente o semicaliente en central en mezclas AC, BBTM, SMA y AUTL con incorporación de RA por encima del límite de la norma.
- Evolución de la técnica de fabricación de mezclas bituminosas templadas, en central, actualmente fuera del marco normativo, y con incorporación de RA.
- Empleo de ligantes de origen vegetal o renovable para sustituir parcial o totalmente betunes (bioligantes) y emulsiones tradicionales (bioemulsiones)
- Mejora de las prestaciones del firme mediante la incorporación de aditivos a base de grafito en la fabricación de mezclas bituminosas o con el desarrollo de subbases tratadas con cemento, de altas prestaciones, para optimizar espesores de firmes.

3.1.4 Plan de firmes sostenibles de la Generalitat de Catalunya

En 2016, la Generalitat de Catalunya a través del Departamento del Territorio inició el *Plan de firmes sostenibles*, que tiene como objetivo realizar mejoras en firmes de carreteras; para ello, se han incorporado materiales más sostenibles y se han implementado nuevas técnicas en el diseño y fabricación de mezclas, y en la ejecución de las obras. Este plan se enmarca dentro del programa de Compra Pública de Innovación, cuyo objetivo era afrontar diversos retos. Entre ellos, reducir las emisiones mediante la temperatura de fabricación de las mezclas, minimizar el consumo de materiales naturales y promover la reutilización o reciclado de materiales, tales como los provenientes del fresado, áridos siderúrgicos, residuos cerámicos, aceites de motor, plásticos, entre otros. Además, se buscaba analizar el ciclo de vida del firme rehabilitado para confirmar su sostenibilidad y comparar el comportamiento de un firme innovador con el de un firme convencional.

En los 124,4 km divididos en 12 actuaciones se obtuvo un ahorro de 1.170 toneladas de CO₂ eq respecto de los métodos convencionales, lo que representa una reducción de emisiones del 25 %. En el marco del plan de firmes sostenibles, se destacan los siguientes proyectos [30][31]:

- Mezcla innovadora BBTM con alta tasa de polvo de neumáticos al final de su vida útil (NFVU) fabricada a menor temperatura [32].
- Mezclas bituminosas tipo SMA [33].
- Mezclas bituminosas altamente modificadas con caucho de NFVU pretratado, incorporado por vía seca [34].
- Mezclas asfálticas recicladas con bioligantes rejuvenecedores [35].
- Mezcla innovadora con betún modificado con caucho procedente de NFVU [36].
- Microaglomerados en frío eco-innovadores [37].

3.1.5 Planes de acción climática y experiencias del Ayuntamiento de Barcelona

El Ayuntamiento de Barcelona definió un Plan de acción para la emergencia climática para la agenda 2030 [38]. Entre las diferentes líneas de acción, aquellas que tienen relación con los pavimentos de la ciudad son:

- Intervenir sobre los pavimentos y las terrazas de la ciudad para incrementar el índice de reflectancia y contribuir a mitigar el efecto de la isla de calor.
- Favorecer la infiltración de agua en el subsuelo; una de estas acciones está enfocada en la gestión del agua de escorrentía en el modelo urbano de la ciudad, por medio de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
- Incorporar instalaciones de energía solar en el espacio público mediante pérgolas o pavimentos generadores; en cuanto a éstos, las acciones que se deben impulsar en el corto plazo están enfocadas a evaluar la incorporación de la generación en otros elementos del espacio público, como pavimentos de plazas, de vías, etc.
- Retirar pavimento en tres (3) hectáreas y recuperar suelo orgánico.

Una medida de gobierno recientemente publicada por el Ayuntamiento de Barcelona es el *Pla Clima [8]*, el cual define todas las políticas climáticas y acelera las medidas hacia la neutralidad climática a través de seis (6) ejes de acción. Las actuaciones que tienen relación con los pavimentos, son:

- Desarrollar tramos piloto con pavimentos reflectantes para determinar su eficacia para reducir el efecto isla de calor.
- Emplear pavimentos permeables en algunos espacios.
- Implementar siete (7) hectáreas de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
- Retirar pavimento en tres (3) hectáreas y recuperar suelo orgánico.
- Reducir las emisiones derivadas de la construcción.
- Definir criterios de contratación que descarbonicen.

Otros casos en Barcelona tienen relación con la instalación de mezclas bituminosas incorporando residuos, entre ellos, plásticos no reciclables que estaban destinados a ir a un vertedero o a incineración, residuos provenientes de la industria siderúrgica y de la fabricación de tintas de tóner de impresoras.

Una de estas mezclas que incorpora plástico en el betún, se empleó en la repavimentación de un tramo del carril bus de la Avenida Diagonal con calle Numancia, por donde circulan diariamente más de 2.000 autobuses y 2.500 taxis. Las obras ejecutadas en el año 2022, estuvieron a cargo de la empresa Agustí y Masoliver. El aditivo plástico denominado MR6 suministrado por la empresa MacRebur, permite obtener una reducción de 11,32 kg de CO₂ emitido a la atmósfera por cada tonelada de mezcla [41]. En este tramo se evitó que 2.600 kg de plástico fueran llevados a vertedero [41][42].



Figura 17. Tramo en la Avenida Diagonal (Barcelona) en donde se empleó una mezcla bituminosa con plástico no reciclable.

Fuente: [42]

En el año 2023 se realizó una prueba piloto de una mezcla bituminosa que incorpora residuos de la fabricación de tinta de tóner de impresoras y plásticos no reciclables como sustitución parcial del betún. Este material fue instalado en la calle Josep Soldevila del distrito de Sant Andreu, se emplearon 3.717 kg de plástico no reciclable, equivalente a 2.478 bolsas y se estimó una reducción de emisiones de 14 t CO₂ con respecto a una mezcla bituminosa convencional [43].



Figura 18. Tramo en calle Josep Soldevila (Sant Andreu, Barcelona) en donde se empleó una mezcla bituminosa con plástico no reciclable y residuos de tinta de tóner de impresora.

Fuente: [44].

Otra experiencia en la ciudad tiene relación con el Plan Endreça, en la que ELSAN, filial de OHLA realizó los trabajos de rehabilitación del pavimento en Vía Júlia. Una de las mezclas bituminosas utilizadas como capa intermedia en el firme, fue una AC22BIN 35/50S 20R, diseñada y fabricada con una tasa del 20 % de RA, que permite reducir el empleo de árido de cantera. La mezcla para la capa de rodadura, consistió en una SMA11 35/50 100SIDE NFU, fabricada con el 100 % de áridos de procedencia siderúrgica, tanto en la fracción fina como en la gruesa. Este árido fue suministrado por

Adec Global y es considerado un residuo proveniente de acerías. Esta mezcla, incluida en el proyecto Elsansono, incorpora 1 % de polvo de caucho pretratado, lo cual, junto con la granulometría, le confieren características sono-reductoras a esta mezcla. Además, la fabricación de esta mezcla ha sido a una temperatura inferior a 150 °C, lo cual reduce las emisiones de CO₂ [45].



Figura 19. Rehabilitación de vía Júlia con mezcla bituminosa con árido siderúrgico, adición de polvo de NFVU, sono-reductora.

Fuente: [45].

3.2 Casos en Francia

El Instituto de carreteras, vías e infraestructuras para la movilidad de Francia (IDRRIM) reúne a todos los agentes públicos y privados del sector de las infraestructuras de transporte; en su página de internet tiene publicaciones de documentos técnicos de productos y procesos innovadores desarrollados por empresas, algunos de los cuales se han probado en vías vehiculares, peatonales y carriles de bicicletas. A continuación, se presentan algunas de estas experiencias.

3.2.1 Tupin-et-Semons. Rhône

El proyecto consistió en aplicar el revestimiento ecológico y permeable BioKlair® para sustituir la arena estabilizada en un tramo de 2 km de la ViaRhône, una ruta para bicicletas que une el lago Lemán con el Mediterráneo, situada en la Île du Beurre (Ródano). Esta es una zona natural protegida con riesgo de inundación, donde está prohibido el ingreso de vehículos motorizados y no es posible compactar la mezcla mediante vibración [45].

Este revestimiento sustituye el betún por ligante de color claro y parcialmente vegetal, fabricado a partir de coproductos de la silvicultura y la industria papelera y sellado por una resina sintética. Las mezclas se almacenan y fabrican a temperaturas de 130 °C a

140 °C. Este revestimiento se puede diseñar con características permeables para gestionar las aguas de escorrentía y combatir el efecto de las islas de calor. Su uso está destinado principalmente a vías peatonales, carriles bici, plazas, parques, jardines, entre otros [47].

En este tramo se aplicaron 350 t de revestimiento, con áridos locales de color claro de granulometría 0/6 mm, en un espesor de 4,5 cm. Las emisiones de puesta en obra por el uso de equipos de menor tamaño empleando Bioklair® fue de 7,7 t CO₂ eq en comparación con las 8,2 t CO₂ eq de una mezcla convencional. Las emisiones inducidas son -10 t CO₂ eq en comparación con los 6,1 t CO₂ eq de una mezcla convencional, es decir, que la presencia de una proporción de materiales de origen biológico del BioKlair® permite la captura de carbono [48][49].



Figura 20. Vía de bicicletas con Bioklair® en Tupin-et-Semons, Rhône, Francia.

Fuente: IDRRIM [45].

3.2.2 Ravin de Ganay. Aix-en-Provence

La Dirección de movilidad por carretera del Ministerio de la transición ecológica y cohesión de territorios de Francia lanzó una convocatoria de proyectos de innovación vial para animar a las empresas constructoras a innovar en el ámbito técnico de las carreteras y las vías urbanas y llevar a cabo experimentos a escala real. Uno de estos proyectos, supervisado por el Centro de estudios y de experimentación de riesgos, medio ambiente, movilidad y desarrollo (Cerema), es la aplicación del revestimiento CarbonLight®, que es una mezcla de árido asfáltico reciclado y un ligante con huella de carbono cero, de origen vegetal procedente de la silvicultura y de la industria papelera combinado con betún convencional. Esta mezcla es producida a temperatura templada y puede ser empleada como capa de rodadura o base asfáltica en vías con todo tipo de tráfico [50].

Esta mezcla con CarbonLight®, tipo BBSG, de granulometría 0/10 fue puesta en obra en el año 2022 en Ravin de Ganay, en una longitud de 500 m y en un espesor de 5 cm. Esta mezcla puede reducir en un 30 % las emisiones de CO₂, en comparación con una mezcla bituminosa convencional [51].



Figura 21. Vía con CarbonLight® en Ravin de Ganay, Aix-en-Provence, Francia.

Fuente: IDRRIM [51].

3.2.3 Rue de la Blanchisserie. Belleville-en-Beaujolais

En la calle de la Blanchisserie localizada en la ciudad de Belleville-en-Beaujolais, Francia se implementó un ecosistema natural llamado ÉcOasis®, el cual permite la infiltración de agua a través del pavimento, su reserva, distribución y evapotranspiración, lo cual crea una “isla de frío” que ayuda a combatir la impermeabilización del suelo, mejora el albedo al tener un pavimento de color claro, hace efecto sombra y facilita la evapotranspiración. Además, es un refugio para soportar las olas de calor, re-naturaliza los espacios urbanos y favorece el retorno de la biodiversidad (nidificación, polinización, etc.) [52][53].

Para abordar el problema creciente de las sequías y el aumento de la canícula, esta ciudad ha implementado una solución combinada empleando CarbonLight® en calzada y Bioklair® en aceras. Además, ha apostado por masificar la vegetación y crear una reserva de agua para favorecer la evapotranspiración mediante el sistema ÉcOasis®, el cual permite almacenar hasta 500 m³ de agua [54].

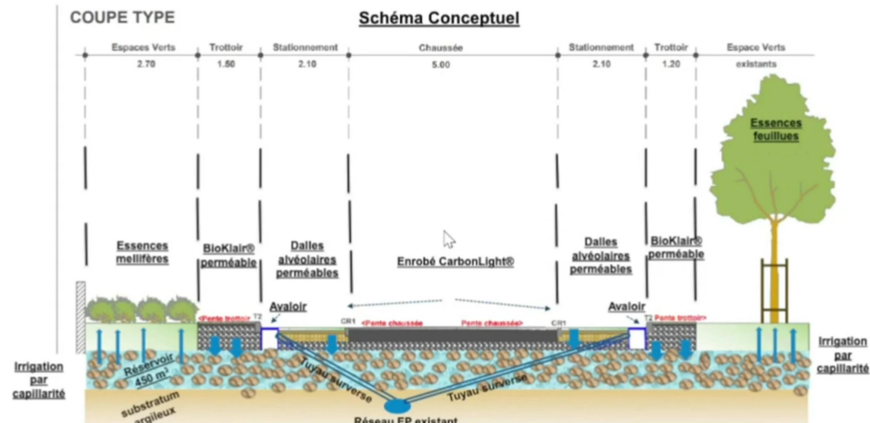


Figura 22. Esquema del sistema ÉcoOasis.

Fuente: <https://www.eiffageroute.com/ecoasis> [54].

Otro de los proyectos que se está llevando a cabo en Francia se denomina *Plus fraîche ma ville*, el cual está respaldado por la Agencia de la transición ecológica (ADEME, por sus siglas en francés) y tiene como misión ayudar a las autoridades locales a elegir soluciones sostenibles para combatir el sobrecalentamiento a nivel urbano. Estas soluciones abarcan una visión global al problema del efecto de las islas de calor en las ciudades francesas y tienen diversas aplicaciones en edificaciones, colegios, plazas, espacios verdes, zonas de parking, vías, entre otros. Dependiendo de la escala en la que se quiera implementar determinada solución, bien sea a nivel territorial o local, se recomiendan métodos de diagnóstico, se presentan indicadores a tener en cuenta con sus ventajas y puntos de control, así como los tiempos de implementación, los costes asociados y la reducción de temperatura esperada [55]. Estas soluciones están clasificadas como verde, azul y gris, dependiendo de si hacen referencia a soluciones basadas en la naturaleza, si involucran manejo de agua, o si están relacionados con materiales de la infraestructura urbana, respectivamente. En uno de los documentos publicados por ADEME [56], se proponen diecinueve (19) soluciones para combatir el sobrecalentamiento urbano, con los impactos y co-beneficios asociados a cada solución, su potencial de aplicación en diferentes escalas (ciudad, espacio público, edificios), los fenómenos a controlar (evapotranspiración, sombra, albedo, viento, etc.) y los efectos en la ciudad y en el peatón, tanto de día como de noche. Entre estas soluciones, aquellas que tienen relación con los firmes son los revestimientos con materiales de albedo elevado, las capas permeables o el empleo de materiales con cambio de fase.

De este proyecto, se destaca que, si bien en los últimos años se han llevado a cabo numerosas investigaciones, aún falta mucho para disponer de modelos fiables y datos cuantificables sobre la eficacia de estas soluciones. Además, se advierte que no existe una única solución o combinación de soluciones de refrigeración que pueda aplicarse

sistemáticamente a todas las situaciones, ya que los efectos de cada solución difieren según el contexto urbano en el que se utilicen. Por último, recomienda realizar un análisis detallado del contexto, los problemas y los efectos previstos de cada proyecto para elegir la solución o soluciones de refrigeración más adecuadas y advierte que se debe tener cuidado de extrapolar estos resultados a otras ciudades [56]. Un programa estratégico de este tipo, para combatir el efecto del sobrecalentamiento en la ciudad, que permita tomar decisiones a diferentes escalas, es una alternativa interesante para aplicar en la ciudad de Barcelona, que también cuenta con un clima tipo mediterráneo. Un punto de partida apropiado, consistiría en realizar la microzonificación climática de la ciudad a partir de la captura de información primaria o empleando información existente (por ejemplo, datos satelitales, datos del repositorio BIGG Ontology [57], o similares) y a partir de esta información, crear una herramienta para la toma de decisiones sobre actuaciones en el contexto urbano. Si bien, este tipo de soluciones no se presentan en el capítulo 5 de este documento, debido a que está enfocado en las actuaciones a nivel de firmes de calzadas y aceras de la ciudad, se considera imprescindible que en la ciudad se abarquen proyectos a escala global.

5 DETECCIÓN DE RETOS Y LÍNEAS DE INNOVACIÓN. POSIBLES APLICACIONES EN BARCELONA

Diferentes países coinciden en que la mayor fuente de emisiones de carbono en la construcción y el mantenimiento de vías es la producción de materiales, entre ellos el hormigón y las mezclas bituminosas, así como su transporte y las actividades de construcción asociadas a su uso; por ello, los esfuerzos que se realizan a nivel mundial, de cara a la reducción de emisiones de carbono e incluso, a la obtención de la neutralidad en carbono, están enfocados en el caso de las mezclas bituminosas, a reducir temperaturas de fabricación, considerar mayores tasas de empleo de material asfáltico proveniente de fresado (RA) e incorporar el uso de bioligantes. Para el caso del hormigón, las actuaciones se han enfocado en usar cementos con emisiones reducidas en la producción de clínker, reducir el contenido de cemento en el hormigón mejorando el diseño de mezclas y adoptar mayores tiempos para lograr el 100 % de resistencia en hormigones con alta reducción de clínker.

En la revista RUTAS de la Asociación Técnica de Carreteras de España se ha publicado un artículo [56] sobre soluciones para una pavimentación ecológica a partir de los resultados de la encuesta realizada por el Comité Técnico D.2. Firmes de carretera de la PIARC⁶ [59]. A continuación, se presentan de manera resumida las estrategias en las diferentes fases de vida de un firme para mejorar su sostenibilidad:

- **Diseño:** cambiar de especificaciones por prescripciones a especificaciones por prestaciones, para poder adaptarse a las características de los nuevos materiales y optar por pavimentos de larga duración, ya que una mayor vida útil tiene gran impacto en la sostenibilidad.
- **Producción de áridos:** Aumentar el uso de reciclados, incorporar subproductos o materiales de desecho y reducir la explotación y uso de materiales vírgenes.
- **Mezclas bituminosas:** Aumentar el uso de RA, emplear mayores niveles de polimerización y adición de caucho, usar mezclas de baja temperatura, reducir o reemplazar el ligante de origen fósil, mejorar la seguridad mediante la reflectancia de la superficie, reducir el ruido, desarrollar ligantes que mejoren el soporte estructural y prolonguen la vida útil.
- **Hormigón:** Emplear granulometrías mejoradas de los áridos, utilizar nuevas materias primas para sustituir la caliza por otras fuentes de calcio no

⁶ PIARC: Asociación mundial de la carretera. World Road Association. Association mondiale de la route.

carbonatadas y del cemento con adiciones (*blended cements*) y reducir el uso del agua en la producción del hormigón.

- **Mantenimiento:** Seleccionar pavimentos con bajos requerimientos de mantenimiento, mejorar diseño de mezclas bituminosas para maximizar las prestaciones, considerar reciclado in situ al rehabilitar, seleccionar proceso de molienda que garantice al máximo el porcentaje de reutilización, garantizar la máxima calidad del reciclaje mediante el fresado de capa por capa, optar por mantenimiento preventivo.
- **Contratación pública ecológica:** Se mencionan herramientas que aplican diferentes países; por ejemplo, en Países Bajos se tiene puntuación según el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y para ello, emplean una herramienta informática; en Bélgica se inició un proyecto piloto con indicadores ambientales, sociales y costes directos; en Noruega se exigen las Declaraciones Ambientales de Productos (EPD) en las ofertas; en Reino Unido son claves los indicadores de ruido, biodiversidad y calidad del aire; en Francia se otorgan beneficios si se cumplen determinados criterios ambientales.

Debido a que se está trabajando en un marco estratégico para la descarbonización, tanto a nivel nacional como internacional, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible de España está comprometida con este objetivo a través de un plan que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030. Este plan incluye la medición de la huella de carbono, que abarca tanto las emisiones directas como las indirectas e impulsa la descarbonización en proyectos de construcción, acondicionamiento, mejora y rehabilitación de los firmes de carretera y sus pavimentos, según los lineamientos establecidos en la Orden Circular 3/2024 [9].

Con base en la recopilación de información, en los compromisos ambientales de España y de la ciudad de Barcelona y en los objetivos a cumplir en lo que respecta a las emisiones de CO₂ y la neutralidad en carbono, se ha realizado un análisis del estado del arte de las diferentes tecnologías y materiales, con sus ventajas y limitaciones, se ha investigado la aplicación de estas tecnologías y materiales en experiencias llevadas a cabo a nivel nacional e internacional tanto en calzadas como en aceras en servicio, y se ha evaluado el nivel de madurez de estas tecnologías para delimitar aquellas con mayor potencial de aplicación en la ciudad de Barcelona.

A partir de lo anterior, y teniendo en cuenta que las emisiones de CO₂ son generadas en todas las etapas del ciclo de vida de las unidades de obra, se presentan las propuestas de actuación que pueden ser ejecutadas en la ciudad y que pueden estar

al alcance del Ayuntamiento de Barcelona. Por ejemplo, por no ser una acción directa a implementar por parte del ayuntamiento, en este documento no se incluyen dentro de estas propuestas, el cambio de tecnologías en las plantas de producción de mezcla bituminosa y de hormigón para el secado o calentamiento de áridos, o la reducción de emisiones en las etapas de transporte y de puesta en obra; sin embargo, esto no quiere decir que estas actuaciones no tengan igual o mayor relevancia para conseguir el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ entre todos los actores que intervienen en la planificación, diseño, ejecución y mantenimiento de los firmes de la ciudad.

El documento *Plec Tècnic de Pavimentació* del Ayuntamiento de Barcelona [9] contiene secciones transversales de firmes para aplicar en calzadas y aceras; a partir de esto, las actuaciones, retos y líneas de innovación propuestas se han agrupado en tres categorías, la primera categoría está enfocada en mantener el tipo de sección transversal, cambiando los materiales o unidades de obra; la segunda, se orienta a cambiar la sección transversal y la tercera presenta otros retos, que no necesariamente están enmarcados en las dos categorías anteriores.

5.1 Actuaciones y retos enfocados en mantener el tipo de sección, cambiando las unidades de obra

Actuaciones y retos en mezclas bituminosas

- Reutilización de mezclas aumentando el contenido de material asfáltico proveniente del fresado (RA)
 - Retos: Si bien, ya se tienen varios años de experiencia en la incorporación de material proveniente del fresado, algunos retos para las diferentes técnicas de reciclado son:
 - Reciclado en central, técnica en caliente: Determinar hasta qué tasas de RA se puede llegar sin detrimento de la durabilidad de la mezcla. Se requiere la adaptación de plantas de fabricación de mezclas para incorporar RA. Hacer estudios de fatiga en laboratorio y seguimiento de tramos a escala real. Estudiar la incorporación de rejuvenecedores al betún. Buscar un porcentaje óptimo de RA en función de un balance ambiental (cálculo de huella de carbono) y estructural sin que se reduzca la vida útil del material.
 - Reciclado en central, técnica en frío: Definir una guía de uso de esta técnica, ya que actualmente no se cuenta con normativa. Incorporar residuos en la mezcla, por ejemplo, neumáticos fuera de su vida útil (NFVU). Buscar optimizar las propiedades de la mezcla en función de un

- balance ambiental (cálculo de huella de carbono) y estructural, sin que se reduzca la vida útil del material.
- Reciclado *in situ*, técnica en frío. Optimizar procedimiento de ejecución a través de la selección de maquinaria. Estudiar un procedimiento de control de compactación. Buscar un balance entre el componente ambiental (cálculo de huella de carbono) y estructural, sin que se reduzca la vida útil del material.
- Uso de bioligantes que sustituyan parcial o totalmente los betunes derivados del petróleo
 - Reto: Estudiar bioligantes disponibles en el mercado y validar su uso en mezclas bituminosas. Estudiar la posibilidad de sustituir el 100 % del betún de origen fósil por bioligante. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes productos y dosificaciones.
 - Reducción de temperatura de fabricación de mezclas mediante el empleo de mezclas en frío, mezclas templadas y mezclas semicalientes
 - Reto: Determinar la durabilidad de estas mezclas en tramos en servicio, realizar monitoreo a largo plazo del estado de los firmes y contrastarlo con las diferentes condiciones de servicio (cargas y tipo de tráfico, condiciones medioambientales, etc.). Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes productos y dosificaciones.
 - Incorporación de residuos: polvo de neumático, escorias, residuos de construcción y demolición (RCD), biochar, plásticos, cenizas, entre otros
 - Reto: Estudiar de manera particular los residuos locales, conocer y tener registro del origen geográfico de los residuos para determinar cuál es el aporte de la distancia de transporte en la huella de carbono. Comparar las propiedades de una misma mezcla utilizando diferentes residuos para determinar cuál puede tener una aplicación más generalizada. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes productos y dosificaciones.
 - Uso de mezclas bituminosas en las aceras (mezclas bituminosas reflectantes que reduzcan el efecto isla de calor urbana)
 - Reto: Estudiar contenidos óptimos de formulaciones. Realizar seguimiento a tramos de prueba, incluyendo la medición del ruido. Determinar la durabilidad de estas mezclas en tramos en servicio.

Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono.

- Combinar varias de las técnicas anteriores
 - Reto: Estudiar contenidos óptimos de los diferentes materiales y/o tecnologías y su aplicación en mezclas bituminosas. Determinar la durabilidad de estas mezclas en tramos en servicio, realizar monitoreo a largo plazo del estado de los firmes. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes productos y dosificaciones.

En todos los casos, se debe buscar que la aplicación de las diferentes tecnologías esté en función de un balance ambiental (reducción de la huella de carbono) y de capacidad estructural (resistencia acorde con las sollicitaciones de carga y condiciones medioambientales) sin que se reduzca la vida útil del firme.

Actuaciones y retos en hormigones

- Empleo de cemento con mayor cantidad de aditivos (blended cements) reduciendo el contenido de cemento Portland
 - Reto: Estudiar la resistencia de hormigones fabricados con cementos con mayor cantidad de aditivos y evaluar su durabilidad. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes productos y/o dosificaciones.
- Empleo de cementos activados alcalinamente (geopolímeros) obtenidos a partir de desechos industriales, como sustitución del cemento
 - Reto: Estudiar las propiedades de resistencia de hormigones fabricados con geopolímeros y evaluar su durabilidad. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes productos y/o dosificaciones.
- Uso de residuos de construcción y demolición en la fabricación de hormigones
 - Reto: Estudiar las propiedades de resistencia de hormigones fabricados con diferentes porcentajes de incorporación de residuos de construcción y demolición y evaluar su durabilidad. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para hormigones con diferentes dosificaciones de estos residuos.
- Optimizar contenido de cemento en el diseño de mezcla

- Reto: Realizar el diseño de mezcla con diferentes dosificaciones aguacemento y optimización de la granulometría de los áridos, estudiar sus propiedades de resistencia y evaluar su durabilidad. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para las diferentes alternativas.
- Empleo de hormigones permeables para formar espacios tipo "islas de frío"
 - Reto: Seleccionar vías peatonales o vehiculares cuya sección permita la construcción de infraestructura para la captura, conducción y reserva de agua. Investigar la implementación en vías con diferentes categorías de tráfico. El trabajo interdisciplinario es fundamental para la evaluación del efecto sombra que aporta la vegetación y que favorezca la renaturalización y el retorno de la biodiversidad. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para las diferentes alternativas.

Se recomienda que este tipo de soluciones que involucran firmes con mezclas bituminosas o de hormigón, se apoyen en proyectos a escala global, para emplear herramientas que permitan una toma de decisiones acertada sobre aquellas vías o zonas en donde se tendría un mayor impacto con su implementación.

En todos los casos, se debe buscar que la aplicación de las diferentes tecnologías esté en función de un balance ambiental (reducción de la huella de carbono) y de capacidad estructural (resistencia acorde con las solicitaciones de carga y condiciones medioambientales) sin que se reduzca la vida útil del firme.

Actuaciones y retos en capas granulares:

- Aumentar el porcentaje de incorporación de residuos de construcción y demolición
 - Reto: Estudiar las propiedades de resistencia de capas de base o subbase empleando residuos de construcción y demolición y evaluar su durabilidad. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para los diferentes contenidos de estos residuos.
- Uso de RA como material granular. En aquellos casos en donde se requiera emplear el RA excedente y así evitar que éste se lleve a vertedero
 - Reto: En principio, se debe propender por emplear el material proveniente del fresado de las capas bituminosas para emplearlo en la fabricación de nuevas mezclas; sin embargo, se podría emplear en

capas granulares de base y subbase en aquellos casos en donde en la misma obra se puedan aprovechar, evitando largas distancias de transporte a plantas de fabricación de mezclas o peor aún, que su destino final sea un vertedero. La consideración de emplear RA en capas de base o subbase deberá estar acompañada del análisis del ciclo de vida y del cálculo de la huella de carbono para cada caso.

En todos los casos, se debe buscar que la aplicación de las diferentes tecnologías esté en función de un balance ambiental (reducción de la huella de carbono) y de capacidad estructural (resistencia acorde con las sollicitaciones de carga y condiciones medioambientales) sin que se reduzca la vida útil del firme.

5.2 Actuaciones y retos enfocados en cambiar la sección transversal

- Sustituir la capa de hormigón por capas de materiales tratados con cemento, por mezclas bituminosas de alto módulo o por capas granulares
 - Reto: Realizar el cálculo estructural para que las nuevas secciones de firme resistan las sollicitaciones de carga a las que estará sometido. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para las diferentes alternativas, con el fin de llegar a un balance entre su capacidad estructural y su sostenibilidad.
- Sustituir el *panot* de las aceras por mezcla bituminosa convencional o reflectante
 - Reto: Realizar el cálculo estructural para que la nueva sección de firme resista las sollicitaciones de carga a las que estará sometido. Además, realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y cálculo de huella de carbono para la nueva sección, con el fin de llegar a un balance entre su capacidad estructural y su sostenibilidad.
- Proyecto de elaboración de catálogo de secciones de firme y aceras
 - Reto 1: optimización de algunas capas de los firmes de calzadas y aceras o de la sección completa, adaptando los espesores en función de la categoría y/o tipología del tráfico y de la capacidad estructural de las diferentes capas. Se podría desarrollar un estudio de la huella de carbono similar al de la Orden Circular OC 3/2024 [9]. Para el caso del empleo de residuos de construcción y demolición se tiene como ejemplo el Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de la Junta de Andalucía [61].

- Reto 2: Emplear herramientas informáticas que permitan calcular el análisis del ciclo de vida (ACV) a partir de las unidades de obra de una licitación.

En todos los casos, se debe buscar que la aplicación de las diferentes tecnologías esté en función de un balance ambiental (reducción de la huella de carbono) y de capacidad estructural (resistencia acorde con las solicitaciones de carga y condiciones medioambientales) sin que se reduzca la vida útil del firme.

5.3 Otros retos

- Hacer pruebas *in situ* de una o varias de las tecnologías citadas anteriormente o con una combinación de éstas, en colaboración con empresas que promuevan la aplicación de estas tecnologías o que puedan combinar dos o más técnicas. A manera de ejemplo, se puede emplear una mezcla bituminosa con temperatura de fabricación menor que una mezcla convencional, que incorpore altas tasas de material proveniente de fresado (RA) y empleando bioligantes.
- Hacer tramos de prueba con tecnologías poco probadas tanto en calzadas como aceras, bien sea en vías en servicio o pistas de prueba en donde se simule la aplicación de cargas de tráfico. A manera de ejemplo, se puede trabajar con la pista de ensayo acelerado de firmes a escala real del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX).
- Hacer seguimiento a largo plazo y trazabilidad a tramos de prueba y tramos piloto.
- Adaptar los pliegos de condiciones técnicos para que se incluyan los retos mencionados anteriormente, incluyendo la valoración de criterios de sostenibilidad, declaración ambiental de productos (DAP), análisis del ciclo de vida (AVC) y cálculo de la huella de carbono.
- Crear y alimentar una base de datos con la información que el Ayuntamiento solicite a los contratistas de obra durante la ejecución de proyectos de construcción y conservación de firmes. Esta información es referente a emisiones en las diferentes fases del ciclo de vida, debido a que las emisiones de algunas de estas etapas hoy se desconocen casi por completo, o si se conocen, no se cuenta con un registro adecuado y



accesible. Esta información se puede utilizar en conjunto con el banco de datos de precios asociados con sus emisiones que emplean algunas administraciones actualmente.

Es importante indicar que las anteriores medidas deben estar acompañadas del desarrollo de modelos a escala nacional o local que permitan cuantificar los impactos en la reducción de materiales, en la reutilización y en el reciclado. Asimismo, se debe complementar con un análisis de ciclo de vida con un enfoque en la gestión de pavimentos para permitir a los órganos administrativos ser más asertivos en los tiempos de intervención, enfocándose en mantenimiento de tipo preventivo, y de esta manera lograr una mayor vida útil de las estructuras en los firmes.

Asimismo, se requiere contrastar todas las medidas con la reglamentación existente, analizar su implementación, definir las medidas de promoción en los pliegos, así como su monitorización. El promover el uso de materiales y prácticas de construcción sostenibles, es sin duda un trabajo conjunto con los diferentes actores que intervienen en el proceso: centros de investigación, academia, empresas diseñadoras y constructoras y organismos gubernamentales encargados de la administración de la infraestructura vial.

6 REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas. Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. 1992.
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.
- [2] <https://unfccc.int/es/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>
- [3] United Nations. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. 1997.
<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf#page=24>
- [4] Naciones Unidas. Acuerdo de París. 2015.
https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- [5] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico - MITECO. Estrategia de descarbonización a largo plazo 2050. Estrategia a largo plazo para una economía española moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050. MITECO, 2020.
https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/planes-y-estrategias/ELP_2050.pdf
- [6] <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [7] <https://ajuntament.barcelona.cat/agenda2030/ca/projectes/projectes-europeus/missio-europea-100-ciutats-net-zero>
- [8] Gerència d'Àrea de Mobilitat, Infraestructures i Serveis Urbans. Gerència d'Àrea d'Urbanisme i Habitatge. Pla Clima : Mesura de Govern. Ajuntament de Barcelona. Barcelona, novembre 2024.
<http://hdl.handle.net/11703/138564>
- [9] Ministerio de transportes y movilidad sostenible. Orden Circular OC 3/2024. Sobre el cálculo de la huella de carbono (Etapas de A1 a A5) de la construcción o rehabilitación de firmes.
https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/oc_3-2024_huella_de_carbono_final_vi_0.pdf

- [10] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico - MITECO. Informe de Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. España, marzo de 2024. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/es-nir-edicion-2024.pdf>
- [11] European Asphalt Pavement Association. Towards Net Zero. A Decarbonisation Roadmap for the Asphalt Industry. June 2024.
- [12] National Highways. Net zero highways: our 2030/2040/2050 plan. 2021. www.nationalhighways.co.uk
- [13] Shacat, Joseph, Willis, Richard, Ciavola, Ben. The carbonfootprint of asphalt pavements. A reference document for decarbonization. NAPA & The Road Forward. SIP-109, marzo 2024.
- [14] European Project LIFE. Manual de buenas prácticas y principales resultados. Best practices manual and main results. Life battle CO2. LIFE14 CCM/ES/000404. <https://battleco2.com/>.
- [15] <https://asefma.es/asefma-lidera-la-iniciativa-pionera-para-reducir-las-emisiones-en-la-produccion-de-mezclas-bituminosas-en-espana/>
- [16] <https://asefma.es/la-produccion-espanola-de-mezclas-bituminosas-durante-2022-alcanza-los-1710-millones-de-toneladas/>
- [17] <https://asefma.es/dap-sectorial/>
- [18] AENOR, ASEFMA. Declaración Ambiental de Producto. Mezclas asfálticas tipo AC. Global EPD EN 15804-045. 2023.
- [19] AENOR, ASEFMA. Declaración Ambiental de Producto. Mezclas asfálticas tipo BBTM. Global EPD EN 15804-046. 2023.
- [20] AENOR, ASEFMA. Declaración Ambiental de Producto. Mezclas asfálticas tipo PA. Global EPD EN 15804-047. 2023.
- [21] AENOR, ASEFMA. Declaración Ambiental de Producto. Mezclas asfálticas tipo SMA. Global EPD EN 15804-048. 2023.

- [22] <https://www.recuperaresiduosencementeras.org/observatorio-de-economia-circular/materias-primas-alternativas/>.
- [23] <https://asefma.es/wp-content/uploads/2023/10/DAP-sectorial-de-Asefma-V2.pdf>
- [24] Van Dam, Thomas, Hawkins, Kathleen A. Low Carbon Concrete: Challenges and Opportunities. Webinar. Wiss, Janney, Elstner Associates. <https://www.wje.com/knowledge/webinars/detail/low-carbon-concrete-challenges-and-opportunities>
- [25] Jiménez A., Valeverde, García A., Imanol. Programas de firmes sostenibles efAPaves y ReCOPaves de la Dirección General de Carreteras. Revista de la Asociación mundial de carreteras. RUTAS. ISSN 1130-7102. Julio-septiembre de 2024.
- [26] López, R. La descarbonización de la industria del cemento. Jornada sobre avances en la descarbonización de los materiales de construcción: cemento y hormigón. Barcelona, noviembre de 2024.
- [27] Díaz, E. – Izquierdo, S. – Mejía, R. – Gordillo, M. Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: resistencia mecánica y durabilidad. Revista de la Construcción. 12(3), 53 – 60. 2013. https://www.researchgate.net/publication/264860757_Mezcla_ternaria_de_cemento_Portland_escoria_de_alto_horno_y_piedra_caliza_Resistencia_mecanica_y_durabilidad
- [28] AENOR, ASOCIACIÓN NACIONAL ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE HORMIGÓN PREPARADO (ANEFHOP). Declaración Ambiental de Producto de Hormigones. Global EPD EN 16757-002 rev 1. 2022.
- [29] ASEFMA. Empleo de bioligantes en carreteras. <https://asefma.es/wp-content/uploads/2023/11/Propuesta-premio-MPA-EIFFAGE.pdf>
- [30] Actuacions firmes sostenibles 2022. [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2022]. [Actuacions firmes sostenibles 2022 \(gencat.cat\)](#)
- [31] Actuacions de firmes sostenibles 2022 [audiovisual]. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, 2022. [Actuacions de firmes sostenibles 2022 \[audiovisual\] \(gencat.cat\)](#)

- [32] Mescla innovadora tipus BBTM 8A amb alta taxa de pols de cautxú d'NFVU fabricada a menor temperatura. [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2023]. [Acompanyat de la Fitxa de l'actuació Millora del ferm a la C-12 PK 29+300 – 49+800. Xerta-Rasquera].
- [33] Compra pública verda de mescles bitmunioses tipus SMA. [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2023]. [Acompanyat de la Fitxa de l'actuació Reforçament paviment i adequació d'elements contenció de vehicles a la T-710 PK 0+000 – 0+710 i PK 9+900 – 14+300. Falset-la Vilella Baixa].
- [34] Compra pública verda de mescles bituminoses altament modificades amb cautxú d'NFVU pretractat, incorporat per via seca. [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2023]. [Acompanyat de la Fitxa de l'actuació Reforçament del ferm a la L-310 PK 0+000 – 18+540. Tàrrrega-Guissona].
- [35] Mescles asfàltiques reciclades amb biolligants rejuvenidors. [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2023]. [Acompanyat de la Fitxa de l'actuació Reforçament del ferm a la L-902 del PK 0+360 al 13+060. Almacelles-límit amb província d'Oscà].
- [36] Mescla innovadora amb betum modificat amb cautxú procedent de pneumàtics fora d'ús (NFU). [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2023]. [Acompanyat de la Fitxa de l'actuació Millora de ferm a la GI-514 PK del 0+000 al 6+898 Medinyà-Cornellà del Terri].
- [37] Microaglomerats en fred eco-innovadors. [Barcelona]: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori, [2023]. [Acompanyat de la Fitxa de l'actuació Millora del ferm a la GI-612, del PK 0+000 al 8+026. El Port de la Selva-Llançà].
- [38] Ajuntament de Barcelona. Pla d'acció per l'emergència climàtica 2030. Novembre 2021.
https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/bitstream/11703/123710/1/Pla_accio_emergencia_climatica_2030_cat.pdf
- [39] Ajuntament de Barcelona. Informe anual de seguiment i avaluació de l'Agenda 2030 de Barcelona (Voluntary Local Review 2023).



https://ajuntament.barcelona.cat/agenda2030/sites/default/files/2024-03/VLR_2023_de_lAgenda_2030_Barcelona-CA_1.pdf

- [40] Ajuntament de Barcelona. Barcelona Cicle de l'Aigua, SA Serveis Urbans i Manteniment de l'Espai Públic. Memòria de sostenibilitat. 2023. https://www.bcasa.cat/PDF/Mem_Sostenibilitat_2023.pdf
- [41] <https://www.amsa.es/es/amsa-macrebur/>
- [42] <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/378176-renovacion-carril-bus-Barcelona-evita-mas-2600-kg-residuos-plasticos-acaben-vertedero.html>
- [43] https://www.barcelona.cat/infobarcelona/ca/tema/urbanisme-i-infraestructures/nou-paviment-fet-amb-residus-de-plastics-no-reutilitzables-i-restes-de-toner_1343658.html
- [44] <https://beteve.cat/general/sant-andreu-prova-paviment-plastic-residus-toner/>
- [45] <https://ohla-group.com/elsan-finaliza-los-trabajos-de-rehabilitacion-del-pavimento-en-el-marco-del-plan-endreca-del-ayuntamiento-de-barcelona/>
- [46] https://www.idrrim.com/ressources/documents/12/7983-IDRRIM_Fiche-d-information-BioKlair.pdf
- [47] <https://www.eiffageroute.com/files/live/sites/route/files/Produits/Fiche-BioKlair.pdf>
- [48] <https://ambition4climate.com/mise-en-place-du-revetement-naturel-et-permeable-bioklair-sur-la-viarhona/>
- [49] <https://ambition4climate.com/wp-content/uploads/2022/07/FR-Eiffage-BioKlair.pdf>
- [50] <https://www.cerema.fr/fr/actualites/8-laureats-edition-2023-appel-projets-innovation-routes-rues>
- [51] <https://www.idrrim.com/ressources/documents/source/2/11122-Fiche-information-IDRRIM-Carbon-Li.pdf>





- [52] <https://www.eiffageroute.com/files/live/sites/route/files/Produits/Fiche-Ecoasis.pdf>
- [53] https://www.idrim.com/ressources/documents/12/9510-IDRRIM_Fiche-d-information_EcOasis-.pdf
- [54] <https://www.eiffageroute.com/ecoasis>
- [55] <https://plusfraichemaville.fr/>
- [56] Agence de la transition écologique (ADEME). Rafrâichir les villes. Des solutions variées. ISBN : , 979-10-297-1748-2. 2021
- [57] <https://climatereadybcn.eu/es/>
- [58] París M., Anna, Díaz M., Jesús. Soluciones para una pavimentación ecológica y materiales sostenibles. Revista de la Asociación mundial de carreteras. RUTAS. ISSN 1130-7102. Julio-septiembre de 2020.
- [59] Comité technique / Technical Committee / Comité Técnico D.2 Chaussées / Pavements / Firmes de Carretera. Soluciones para una pavimentación ecológica y materiales sostenibles. Estado del arte de las mejores prácticas, retos y tecnologías nuevas y emergentes. PIARC. ISBN:978-2-84060-600-0, 2019.
- [60] Ajuntament de Barcelona. Plec tècnic de pavimentació. Direcció d'Infraestructures i Espai Urbà – Ecologia Urbana, Espai Urbà. Octubre, 2017.
- [61] Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería de Fomento y Vivienda. Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD). Mayo, 2016.



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las siguientes empresas y profesionales que han contribuido con sus experiencias sobre los temas relacionados con el presente documento:

- ❖ Grupo Eiffage (Eiffage España, Eiffage Francia)
- ❖ Agustí y Masoliver S.A. (AMSA)
- ❖ Asfaltos y Construcciones Elsan S.A. / OHLA
- ❖ Sorigué S.A.U
- ❖ Parma Ingeniería
- ❖ Catherine Lauranson. Encargada de la misión de transición ecológica de la ciudad de Marsella, Francia.
- ❖ José Rebollo Pericot – Pentaedro

