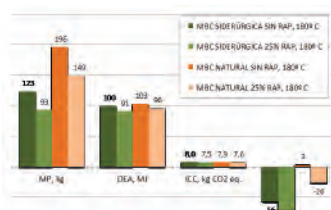


# Análisis de ciclo de vida y árido siderúrgico.

## Valoración ambiental de mezclas bituminosas sostenibles



Life cycle assessment and steel slag aggregate  
Environmental assessment of sustainable  
bituminous mixtures

### José Manuel Blanco Segarra

Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura  
Dirección General de Carreteras, MITMA

### Anna París

PARMA Ingeniería

### Félix Pedroso

ADEC Global

El respeto al medio ambiente y el cálculo del análisis de ciclo de vida deberían siempre formar parte de los criterios considerados a la hora de determinar las soluciones a adoptar en los proyectos de firmas de carreteras, incluidos los de mera renovación de su pavimento. Al diseñar una nueva estructura de afirmado o un nuevo pavimento, el proyectista considera el período durante el cual se espera que soporte la carga de tráfico acumulada que actuará durante ese período y desde la perspectiva del diseñador del pavimento, la vida del pavimento se expresa en términos de nivel de tráfico pesado que va a soportar durante un plazo de tiempo previsto.

Teniendo en cuenta el nuevo paradigma que constituye la denominada economía circular, así como las buenas prácticas disponibles, la Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura

del MITMA, planteó en 2017 el llevar a cabo una actuación de refuerzo con mezclas bituminosas en la carretera convencional N-435, a la altura de la intersección norte de acceso a Fregenal de la Sierra, de manera que se aprovechara cómo árido un residuo (las escorias) de la acería de horno de arco eléctrico existente en la cercana localidad de Jerez de los Caballeros.

La obra se ha ejecutado en noviembre de 2018, fabricándose la mezcla bituminosa en una instalación asfáltica situada a escasa distancia. En este artículo queremos hacer una valoración ambiental de lo que supone medioambientalmente, el empleo de las buenas técnicas disponibles, como es emplear residuos en la fabricación de mezclas bituminosas, a la vez que remarcar cómo el empleo de materiales en su lugar de origen mejora en mucho las valoraciones ambientales.

**E**nvironmental awareness and life cycle analysis calculations should always be part of the criteria considered when identifying the solutions to be adopted in road pavement projects. In the design of a new pavement structure or a new surfacing, the designer considers the period over which it is expected to carry the cumulative traffic load that will act over that period and from the surfacing designer's perspective, the life of the surfacing is described in terms of the level of heavy traffic it will carry over an expected period.

Taking into consideration the new paradigm that comprises the so-called circular economy, as well as the best practices available, the State Roads Demarcation in Extremadura of the now Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda, hereinafter

MITMA, proposed in 2017 to undertake a resurfacing project with bituminous mixtures on the N-435 conventional road, at the northern intersection of the access to Fregenal de la Sierra (Badajoz), so that a waste product (slag) from the electric arc furnace steel plant in the nearby town of Jerez de los Caballeros (Badajoz) could be used as aggregate.

The work was carried out in November 2018, with the bituminous mixture being manufactured at a mix plant located a short distance away. In this article we want to make an environmental assessment of what the use of the best available techniques means for the environment, such as the use of waste in the manufacture of bituminous mixtures, while highlighting how the use of materials in their place of source, greatly improves the environmental assessments.

## Introducción

Las especificaciones vigentes sobre secciones de firmes se han establecido con la consideración implícita de que los materiales que las componen puedan fabricarse, existan en los entornos de la obra —lo que a veces es difícil para determinados tipos y características de áridos— y tengan un buen comportamiento duradero.

Una alternativa al uso de especificaciones prescriptivas es el uso de especificaciones basadas en las prestaciones, en las que éstas contienen límites en el comportamiento de los materiales. Para un material bituminoso, las especificaciones básicas basadas en las prestaciones son límites establecidos en el módulo de elasticidad del material, la resistencia a las deformaciones plásticas y el comportamiento a fatiga. Para los materiales de hormigón, los límites se basarán en la resistencia, el contenido de agua y la trabajabilidad.

Desde hace décadas, los ingenieros en la Demarcación de Carreteras del Estado en Extremadura se

han animado a trabajar con novedades y buenas técnicas disponibles en cada momento en lo que respecta a criterios ambientales y de calidad, y ello ha llevado a la elaboración de proyectos en su día innovadores, que han ido incluyendo buenas técnicas ambientales y dando valor a materiales existentes en el lugar y que se encontraban al final de su vida útil, como es el caso del material reciclado procedente del fresado de mezclas bituminosas para su empleo mediante diversas técnicas

y porcentajes, en la fabricación de nuevas mezclas bituminosas.

Un nuevo paso en esta línea de actuación ha sido la de tomar en consideración materiales residuales consistentes en la escoria negra de la acería de horno arco eléctrico, existente en Jerez de los Caballeros (Badajoz), y redactar un proyecto y ejecutar una obra con árido siderúrgico procedente de dicha escoria negra. La obra ha consistido en el fresado y reposición de mezcla bituminosa fabricada con árido side-



Figura 1. Puesta en obra en la carretera convencional N-435 en Fregenal de la Sierra (Badajoz)

rúrgico en su fracción gruesa, del tipo AC 16 SURF S PMB 45-80/65 y que ha incluido un 25 % de material reciclado procedente del fresado del deteriorado pavimento existente en la carretera convencional N-435, entre los PP.KK. 92+500 y 93+000, a la altura de la intersección “en T” con giro a la izquierda que sirve de acceso norte a Fregenal de la Sierra (Badajoz), situada a 25 km de la localidad de Jerez de los Caballeros en la que se encuentran la acería así como la planta asfáltica empleada para la obra.

En los apartados que siguen se pretende comparar los parámetros ambientales que tendría una mezcla bituminosa en caliente habitual frente a los de la mezcla bituminosa en caliente fabricada simultáneamente con dos tipos de residuos: el árido siderúrgico y un 25 % de RAP.

Además, en los cálculos realizados se ha adoptado un promedio de distancias de transporte de árido habituales (20 a 50 km) para así considerar la ventaja de disponer de una planta y un árido en el entorno próximo de una obra, a distancias menores a las habituales a los lugares de fabricación de los áridos de gravera o cantera.

En una futura actuación de este tipo, que fuese de mayor envergadura, podría estudiarse asimismo los aspectos ambientales derivados de realizar tal tipo de mezclas a, por ejemplo, tres temperaturas distintas, considerando su realización mediante la técnica semicaliente.

## Método

A continuación, se presenta la valoración ambiental de la mezcla bituminosa AC16 S SURF PMB 45-80/65 producida con árido grueso siderúrgico, en un caso con un 25% de RAP y en el otro sin RAP, y fabricada

Tabla 1. Composición de las mezclas bituminosas AC16 S SURF PMB-45/80-65, kg/t de mezcla

COMPONENTE	MB CON ÁRIDO SIDERÚRGICO		MB CON ÁRIDO NATURAL	
	SIN RAP	25% RAP	SIN RAP	25% RAP
Árido fino natural (0/4 mm)	525,09	400,29	572,82	436,02
Árido grueso natural (4/20 mm)	-	-	381,88	285,88
Árido grueso siderúrgico (4/20 mm)	429,62	321,62	-	-
RAP (0/20 mm)	-	250,00	-	250,00
Polvo mineral de aportación, CaCO <sub>3</sub>	28,64	21,44	28,64	21,44
Betún PMB 45/80-55	45,30	35,30	45,30	35,30
SUMA	1.028,64	1.028,64	1.028,64	1.028,64

Tabla 2. Densidades de la mezcla de áridos y de la mezcla bituminosa compactada

COMPONENTE	MB CON ÁRIDO SIDERÚRGICO		MB CON ÁRIDO NATURAL	
	SIN RAP	25% RAP	SIN RAP	25% RAP
Densidad de la mezcla de áridos, t/m <sup>3</sup>	2,956	2,888	2,700	2,700
Densidad aparente de la MBC, t/m <sup>3</sup>	2,582	2,529	2,390	2,390

Tabla 3. Propiedades y condiciones de las materias primas consideradas

Propiedad, condición	Ud	SIN RAP
Calor específico del árido natural	kJ/kg °K	0,880
Calor específico del árido siderúrgico	kJ/kg °K	0,780
Calor específico del betún	kJ/kg °K	2,093
Humedad de los áridos naturales	%	1,5
Humedad del árido siderúrgico	%	1,5
Humedad del RAP	%	4,0
Humedad del polvo mineral de aportación	%	0,0

siempre a 180 °C. Además, se comparan los resultados obtenidos con los que le hubieran correspondido a esta misma mezcla bituminosa si se hubiese elaborado enteramente con áridos naturales.

En las valoraciones aquí efectuadas se ha seguido la metodología de la Guía para la aplicación de una valoración ambiental de las alternativas disponibles en los proyectos de construcción y conservación de carreteras del Gobierno de Aragón, la cual se ha utilizado para establecer sucesivamente los límites del sistema del producto, el alcance temporal de los análisis, la división en procesos unitarios, las entradas y salidas del sistema y las categorías de impacto. Los cálculos se han realizado mediante una herramienta de cálculo de ciclo de vida que permite tomar

en consideración más de cincuenta variables en la determinación de consumos y emisiones vinculados a las operaciones de aprovisionamiento de materias primas, fabricación en central, transporte y puesta de obra de mezclas bituminosas.

Las composiciones de las mezclas objeto de nuestra comparación se han resumido en la Tabla 1. En todos los casos se ha supuesto la incorporación de un 3 % s/a de polvo mineral de aportación y el rechazo de la misma proporción de polvo mineral de los áridos.

Las densidades estimadas (de las mezclas de áridos y las aparentes) de las cuatro mezclas bituminosas comparadas se han reflejado en la Tabla 2. En los cálculos se han considerado que la granulometría

Tabla 4. Distancias de transporte de materias primas y mezcla bituminosa a central

Material	CENTRAL 1	CENTRAL 2
Árido fino natural (0/4 mm)	20 km	1 km
Árido grueso natural (4/20 mm)	50 km	1 km
Árido grueso siderúrgico (4/20 mm)	10 km	-
RAP (0/20 mm)	1 km	1 km
Polvo mineral de aportación, CaCO <sub>3</sub>	100 km	100 km
Betún PMB 45/80-55	100 km	100 km
Transporte de mezcla de central a obra	20 km	50 km

Tabla 5. Composición de las mezclas bituminosas AC16 S SURF PMB-45/80-65, kg/t de mezcla

Característica	Ud	SIN RAP
Capacidad de la central de fabricación	t/h	200
Producción diaria de la central	t	800
Potencia de los motores eléctricos	kW	546
Fuente de alimentación motores eléctricos	-	Red eléctrica
Horas de funcionamiento de la central	Ud.	8
Potencia de la caldera de aceite térmico	Kcal/h	450.000
Horas de funcionamiento de la caldera	Ud.	4
Tipo de combustible utilizado	.	Fuelóleo
Temperatura ambiente y de los acopios	°C	20
Temperatura de fabricación	°C	180
Potencia de la pala cargadora	kW	150
Horas de funcionamiento pala cargadora	Ud.	8
Producción del equipo de puesta en obra	t	800
Potencia de los equipos de puesta en obra	kW	543
Horas de trabajo equipo de puesta en obra	Ud.	10

del RAP reproduce, aproximadamente, la de una mezcla AC16 S y que su contenido de betún es de un 4 % s/m. Los huecos en mezcla son el 5,3 % en las cuatro mezclas.

Las propiedades y condiciones relacionadas con las materias primas que afectan al consumo de combustible en el tambor secador de la central de fabricación, y los valores adoptados, se presentan en la Tabla 3.

Las mezclas bituminosas con árido siderúrgico han sido producidas en una central de fabricación ubicada entonces en el T. M. de Jerez de los Caballeros (CENTRAL 1). En la Tabla 4 figuran las distancias de transporte de materias primas hasta dicha central, así como la correspondiente al transporte de la mez-

cla bituminosa hasta la obra. En la columna contigua se han considerado las que corresponderían a una central alternativa —supuesto que los proyectistas emplean habitualmente en el cálculo de los costes de proyecto y que hemos denominado CENTRAL 2— produciendo la misma mezcla, pero enteramente con áridos naturales.

Finalmente, la Tabla 5 muestra los valores seleccionados en los cálculos en relación con las características de ambas centrales, los medios de transporte y los equipos de puesta en obra que completan la relación de variables que afectan a los impactos ambientales de la fabricación, transporte y puesta en obra de las mezclas bituminosas. Los impactos están calculados por m<sup>2</sup> de

superficie pavimentada, para una capa de 5 cm de espesor.

## Resultados

Los resultados obtenidos para la solución proyectada —mezcla bituminosa en caliente producida a 180 °C en la central 1, con árido siderúrgico y un 25% de RAP— y la alternativa convencional —mezcla bituminosa en caliente, producida a 180 °C en la central 2, con áridos naturales y sin RAP— son presentados en la Figura 2, distinguiéndose los impactos correspondientes a cada uno de los cuatro procesos unitarios (PU) considerados:

1. PU1: Fabricación y transporte de materias primas
2. PU2: Producción en central
3. PU3: Transporte de central a obra
4. PU4: Puesta en obra de la mezcla bituminosa

Las mezclas con áridos siderúrgicos se han considerado calientes con y sin un 25 % de RAP y las mezclas convencionales se han considerado como mezclas en caliente, con y sin un 25 % de material reciclado procedente del fresado de firmes. De todas ellas se han obtenido los siguientes parámetros de valoración ambiental:

- Consumo de materias primas (MP y kg)
- Demanda de Energía Acumulada (DEA, MJ)
- Indicador de Cambio Climático (ICC, kg CO<sub>2</sub> eq).
- Residuos evitados (RE, kg)

Se ha considerado a su vez que la instalación de fabricación de la mezcla en caliente, con árido siderúrgico y con reciclado en caliente al 25 % de RAP, se encuentra a 20 km

de la obra y que una mezcla convencional de cualquier proyecto tipo tiene una distancia promedio de 50 km.

Así, se han realizado, para los cuatro parámetros ambientales, las valoraciones de las siguientes mezclas:

1. AC16 S SURF PMB-45/80-65, con árido siderúrgico, en su fracción gruesa, sin RAP.
2. AC16 S SURF PMB-45/80-65, con árido siderúrgico, en su fracción gruesa, con un 25 % de RAP.
3. AC16 S SURF PMB-45/80-65, con árido convencional sin RAP.
4. AC16 S SURF PMB-45/80-65, con árido convencional con RAP.

El tercero de estos cuatro supuestos de mezcla, es decir una mezcla bituminosa en caliente tipo AC16 S SURF PMB-45/80-65, con árido convencional sin RAP, es la solución habitual contemplada en la mayor parte de proyectos que hasta ahora se realizan en España. Lo es igualmente el establecer unas distancias promedio del lugar de fabricación de los áridos (canteras o graveras) de 20 a 50 km hasta las instalaciones asfálticas y unas distancias promedio de 50 km desde las plantas asfálticas hasta las obras. Ello sin olvidar que, en no pocos casos, en función de las exigencias de calidad de los áridos, pueden manejarse unas distancias superiores a los 200 km desde la cantera hasta la planta asfáltica.

### Interpretación de los resultados

En la figura 2 puede apreciarse cómo el uso de árido siderúrgico y material reciclado procedente del fresado de firmes supone importantes ventajas ambientales en la valoración de los parámetros ambientales estudiados.

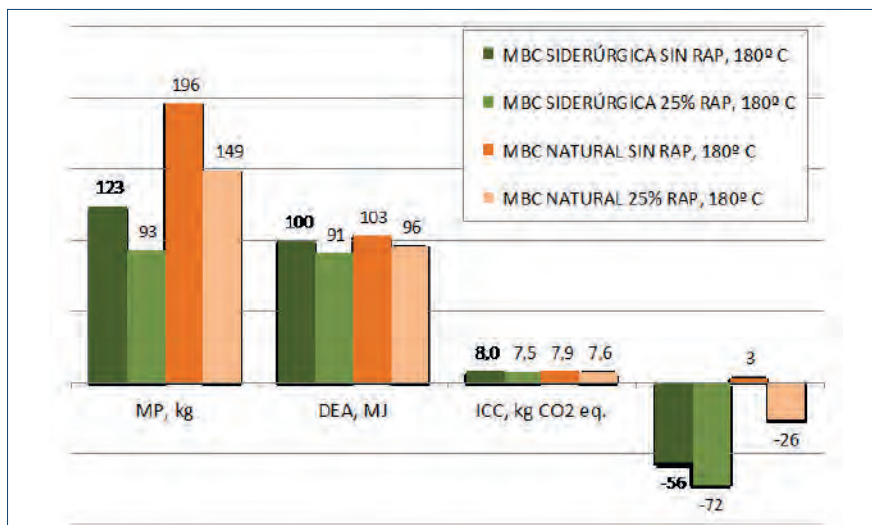


Figura 2. Comparación de las alternativas de mezcla bituminosa con áridos siderúrgicos y naturales para una temperatura de fabricación de 180°C.

### Conclusiones

Todos los impactos ambientales se han calculado por m<sup>2</sup> de superficie pavimentada para una capa de 5 cm de espesor.

El empleo de material reciclado procedente del fresado de firmes, frente al de una mezcla convencional, reduce el consumo de materias primas (MP) de 196 a 149 kg/m<sup>2</sup> lo que representa una reducción del 24 %. Cuando además la comparativa en el consumo de materias primas se realiza entre una mezcla convencional sin reciclado y una mezcla siderúrgica con el 25 % de material fresado, el consumo se reduce en un 53% (de 196 kg a 93 kg).

Haciendo las mismas comparaciones en lo que respecta a la demanda de energía acumulada (DEA) en el primer caso se pasaría de 103 a 96 MJ, reduciéndose en un 7 %, lo que representaría un ahorro de 120 GJ o 34 MWh por jornada de trabajo; y en el segundo caso, es decir, el comparar una mezcla bituminosa en caliente con árido natural sin reciclado frente una mezcla bituminosa siderúrgica con un 25 % de material fresado, la demanda energética acumulada se reduce en un 12 %.

El Indicador de cambio Climático (ICC) es muy similar en todos los casos supuestos, si bien es ligeramente inferior en la mezcla fabricada con árido siderúrgico y material fresado.

En cuanto a residuos evitados (RE) la diferencia resulta ser de 75 kg entre una mezcla bituminosa en caliente fabricada con árido siderúrgico y con el 25 % de material fresado y una mezcla bituminosa convencional, es decir sin árido artificial ni RAP.

Así pues, la ventaja del empleo de árido siderúrgico se justifica sobre todo en el ahorro de recursos naturales y en la reutilización de subproductos que de otro modo serían residuos que habría que llevar a vertedero.

Si se considera una jornada de extendido de aglomerado de 800 t/día, el cual es un promedio habitual en las operaciones de extendido de mezclas bituminosas en las actuaciones de conservación de carreteras, el empleo de árido siderúrgico y de material fresado en la fabricación de la mezcla bituminosa representaría un ahorro de más 600 t de materias primas por jornada de trabajo. Asimismo, el empleo de estos dos subproductos generaría un ahorro

de más de 600 t diarias de residuos que, en caso contrario, habrían de ser llevadas a vertedero.

El Indicador de Cambio Climático (ICC) es muy similar en todos los resultados, aunque el de valor más bajo se da en el caso de la mezcla de la mezcla con árido siderúrgico y 25 % de RAP. Dicho pequeño ahorro en emisiones se debe sobre todo a la menor distancia de la planta asfáltica a la obra (en el caso del árido siderúrgico 20 km frente a 50 km) y a que en las hipótesis se ha tenido en cuenta que el árido natural se encuentra a una distancia de 1 km de la planta y el árido siderúrgico se encuentra a 10 km de la planta asfáltica —es decir, considerando que la planta asfáltica está instalada en la cantera de áridos, práctica habitual en obras en Extremadura—, por lo que este aspecto beneficia al ICC del árido natural.

También es de señalar que se ha considerado que el contenido de betún es idéntico en una mezcla convencional que en una mezcla siderúrgica, pese a que habitualmente, por el factor densidad, una mezcla siderúrgica lleva un menor contenido de betún. Factores ambos, el igual contenido de betún y la distancia del árido natural a la planta asfáltica (se ha adoptado 1 km) ha penalizado los resultados de ICC para la mezcla siderúrgica, y aun así, pese a estas penalizaciones consideradas, el menor valor es el que resulta de la mezcla siderúrgica con un 25 % de RAP.

La evaluación de la sostenibilidad es un tema complejo de llevar a cabo; la disponibilidad de datos fiables, la comparabilidad de las soluciones convencionales respecto a las soluciones más sostenibles, presentan retos importantes para los profesionales. En cualquier caso, las carreteras son un patrimonio público y, por lo tanto, las decisiones sobre adquisición de materiales utilizando criterios de sostenibilidad debe ser una premisa irrenunciable para los promotores de los proyectos y de las obras.

Los diseñadores que consideren nuevos materiales ecológicos deben ser capaces de considerarlos dentro del marco de especificaciones vigentes en cuanto a las especificaciones basadas en el módulo elástico, la resistencia a las deformaciones plásticas y la resistencia a la fatiga del material. Si las especificaciones prescriptivas se cumplen, el material sostenible no debe suponer problema alguno en la toma de decisiones en cuanto a su calidad para la puesta en obra y para la durabilidad de la mezcla.

Con los valores y resultados expuestos en este artículo pretendemos ofrecer al lector un orden de magnitud de lo que supone ingeniar en la redacción de los proyectos y primar, en los diseños de las secciones de firmes, además de la calidad y la durabilidad de las mezclas bituminosas, la importancia de la realización de las valoraciones ambientales

en las tomas de decisiones en los proyectos.

## Referencias

- [1] Ministerio de Fomento; Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG3; Orden FOM/2523/2014 de 12 de diciembre; BOE 03/01/2015.
- [2] Orden Circular 40/2017 Sobre Reciclado de Firmes y Pavimentos Bituminosos
- [3] Nota de Servicio 1/2019 sobre instrucciones para la redacción de los proyectos supervisados por la subdirección general de conservación.
- [4] Mañas, P., Ortiz, J. y del Castillo, J.; Guía para la aplicación de una valoración ambiental de las alternativas disponibles en los proyectos de construcción y conservación de carreteras. Revista Carreteras, núm. 217, Enero-Febrero de 2018.
- [5] París, A. Moncunill, C. y Ortiz J.; El análisis del ciclo de vida como herramienta para la valorización ambiental de la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas en caliente; Revista Carreteras, nº 150, 2006. ❖