



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON ÁRIDO RECICLADO

Trabajo realizado por:
Andrés García Casero

Dirigido:
Pablo Pascual Muñoz

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, Septiembre de 2014

TRABAJO FINAL DE GRADO

ÍNDICE

1.	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	2
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1.	MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE.....	5
2.1.1.	Materiales	5
2.1.2.	Mezclas en capa de rodadura	9
2.2.	MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES Y CON RAP	10
2.2.1.	Introducción.....	10
2.2.2.	Sistemas que reducen la temperatura.....	14
2.2.3.	Material Reciclado (RAP)	24
2.3.	PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA	28
2.3.1.	Equipamiento para la ejecución de las obras	28
2.4.	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	32
2.4.1.	Contexto histórico	34
2.4.2.	Metodología y Normativa	35
2.4.3.	Aplicaciones y beneficios	39
3.	ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.....	40
3.1.	INTRODUCCIÓN	40
3.2.	ESTUDIOS DE ACV DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN EUROPA.....	40
3.3.	ACV de interés para las carreteras	44
3.4.	Bases de datos y herramientas de ACV.....	45
4.	DESARROLLO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	48
4.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	48
4.2.	ESCENARIOS	48
4.2.1.	Mezclas Bituminosas en Caliente.....	48
4.2.2.	Mezclas Bituminosas Semicálidas	56
4.2.3.	Mezclas Bituminosas Semicálidas + RAP	64
4.3.	ALCANCE DEL CICLO DE VIDA	73
4.3.1.	Unidad funcional	73
4.3.2.	Límites del sistema	73
4.4.	INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV)	73
4.5.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV).....	74
5.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	76

5.1.	INTERPRETACIÓN DE CICLO DE VIDA.....	76
5.1.1.	Escenario MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	76
5.1.2.	Escenario MEZCLAS SEMICALIENTES	79
5.1.3.	Escenario MEZCLAS SEMICALIENTES + RAP.....	83
5.2.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	87
6.	CONCLUSIONES.....	91
7.	BIBLIOGRAFÍA	92
Anexo I.	INVENTARIO.....	94
Anexo II.	LIGANTES BITUMINOSOS	99
Anexo III.	MEZCLAS	102
Anexo IV.	RESUMEN DE LA ORDEN FOM/3459/2003.....	108
Anexo IV.	MÁQUINAS.....	119

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El objeto del presente Trabajo Fin de Grado consiste en el desarrollo de una Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la cuna a la tumba específica para mezclas bituminosas que permita la comparación entre mezclas en caliente, semicalientes y mezclas semicalientes donde una fracción ha sido sustituida por reciclados de mezcla asfáltica (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP). Además se llevan a cabo la revisión y análisis de las metodologías y herramientas utilizadas hasta la fecha para la ejecución del ACV para carreteras. Las herramientas de Análisis del Ciclo de Vida han demostrado ser muy eficaces y exhaustivas para evaluar el impacto ambiental global de cualquier tipo de producto, permitiendo analizar los beneficios que pueden acarrear ciertas técnicas frente a otras.

Durante los últimos años este tipo de metodologías ha visto aumentar su aceptación, lo que ha supuesto un notable desarrollo, si bien aún es necesaria una forma más precisa de adaptación a cada aplicación, con el objetivo de lograr una adecuada fiabilidad de los resultados y poder garantizar así las conclusiones arrojadas en cada caso.

En la actualidad, el estado del arte da muestra de una serie de incertidumbres que se han manifestado en la mayoría de los Análisis del Ciclo de Vida realizados (ACV), esta serie de incertidumbres implica la existencia de riesgos todavía sin resolver:

- La presencia de numerosas metodologías susceptibles de ser aplicadas a cada caso conlleva unos resultados, en muchas ocasiones, dispares y heterogéneos.
- Es común aplicar este tipo de metodologías de forma parcial, cosa que impide alcanzar conclusiones consistentes.
- Los datos de los que se dispone tanto en lo relativo a consumos energéticos como de las emisiones, indispensables en el proceso y los posteriores resultados arrojados, en general, provienen de bancos de datos o estimaciones de difícil comprobación.

A la luz de estas debilidades se hace patente la necesidad e importancia del desarrollo de una metodología específica para mezclas bituminosas, que sea de la cuna a la tumba y que permita obtener resultados de forma global, a través de indicadores que sean el resultado de la ponderación de todos los impactos, o bien, que permita la comparación entre varias soluciones empleando indicadores provenientes de la ponderación de varios impactos, elegidos previamente.

Dentro del análisis se incluirán mezclas bituminosas en caliente, mezclas semicaliente y mezclas con materias reciclado (RAP), los impactos ambientales vendrán asociados a:

- El consumo de energía.
- Las emisiones de gases.
- Procesos de producción, su transporte y puesta en obra. Los procesos de mantenimiento, su desmantelamiento una vez finalizada la vida útil y su disposición en vertederos o posterior reciclado (Fig.1).

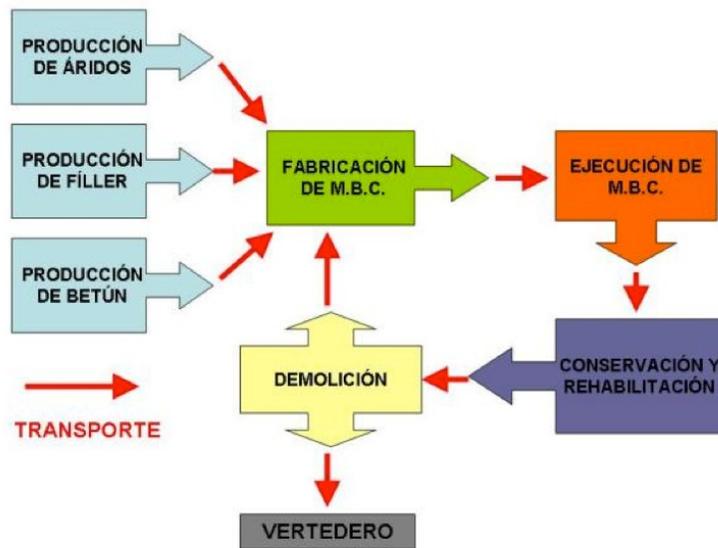


Fig. 1 Esquema genérico de las etapas en la vida de una mezcla asfáltica (Fuente: www.ptcarretera.es).

Dentro de la industria productora de mezclas asfálticas está instaurado el principio de búsqueda constante de soluciones que mejoren las características de la pavimentación, de la manera más eficiente posible, preservando los recursos naturales y maximizando el cuidado del medio ambiente. Reducir las temperaturas en los procesos de producción e incorporar materiales reciclados (RAP) a las mezclas bituminosas son dos de las técnicas con mayor proyección de futuro como soluciones para disipar los impactos ambientales en la ejecución de mezclas asfálticas (Moulthrop et al., 2007).

Una producción más limpia, esto es, menos nociva para el medio ambiente, requiere una reducción de las temperaturas de fabricación sin sacrificar sus características de respuesta mecánica. La reducción de las temperaturas de la que se habla ha permitido desarrollar los procesos de producción y puesta en obra dentro de los siguientes intervalos según qué tipo de mezcla: mezclas bituminosas en caliente (150–190 °C), mezclas semicalientes (100–140 °C), mezclas templadas (60–100 °C) y mezclas en frío (0–40 °C) (EAPA, 2010; Vaitkus et al., 2009).

La mayoría de la literatura consultada destaca las virtudes de las mezclas semicalientes, que incluyen: la reducción del consumo energético en el proceso de mezclado, la reducción de las emisiones, la mejora de las condiciones de trabajo, una menor presencia de gases tóxicos, la disminución de los tiempos de corte de la circulación antes de la reapertura al tráfico, mayor distancia de transporte y holgura en los tiempos de extendido (Rubio et al., 2012). Otra de las claves relativa a las ventajas del empleo de mezclas semicalientes, es su mejor respuesta al empleo de material reciclado RAP. La mejorada trabajabilidad de la mezcla de mezclas semicalientes induce menores temperaturas de trabajo, con menor envejecimiento del betún, contrarrestando el aglutinamiento de RAP.

El empleo de materiales reciclados en la producción de mezclas asfálticas es una solución eficaz, tanto técnica como económica además de la evidente importancia medioambiental. El empleo de RAP se ha visto impulsado respecto al uso de árido virgen a causa del incremento en el precio

del asfalto, la escasez de árido nuevo de calidad y la presión medioambiental de nuestro tiempo. La gran mayoría de estudios realizados han puesto de manifiesto que el empleo de RAP en mezclas bituminosas ayuda a compensar el costo en continuo aumento, preserva los recursos naturales y evitar los problemas que conllevan su disposición en vertedero o su eliminación.

Ciertos estudios han sido desarrollados para evaluar los beneficios potenciales de aplicar mezclas semicalientes (e.g., Barthel et al., 2004; Button et al., 2007; D'Angelo et al., 2008; Kvasnak and West, 2009; Nazzal et al., 2010; Vaitkus et al., 2009). En general, los resultados de estos estudios han mostrado que las emisiones durante el proceso de producción y puesta en obra de las mezclas semicalientes se habían reducido comparado con los de una mezcla en caliente. Además, las semicalientes habían demostrado un comportamiento similar, en rango de uso, al de las mezclas en caliente.

Estos estudios han cuantificado satisfactoriamente algunos de los impactos ambientales potenciales de las mezclas semicalientes en términos de recursos consumidos y emisiones generadas. En la mayoría de los casos el papel de la cadena de suministros primarios, ligados al manufacturado de minerales, betunes asfálticos y productos químicos empleados en los diferentes tipos de mezclas, vinculados a los impactos ambientales asociados al transporte de estos materiales no han sido incluidos en el ámbito de los estudios mencionados anteriormente.

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) puede ser de utilidad para superar las deficiencias señaladas anteriormente, a través de esta metodología se pretende abordar el impacto en todas las etapas de un producto durante su vida (from the cradle to the grave).

Por todo ello, el objeto principal de este estudio consiste en realizar un Análisis del Ciclo de Vida de la cuna a la tumba para mezclas bituminosas en caliente, mezclas semicalientes y mezclas semicalientes con un contenido parcial de RAP, que permita la comparación entre productos y arroje luz sobre las virtudes medioambientales de cada una frente al resto. Como en cualquier estudio del Ciclo de Vida para pavimento de carreteras, los impactos que acarrear el consumo de energía y las emisiones de gas han sido evaluados. En este estudio da comienzo en la planta de producción de la mezcla, y hasta su reposición y transporte hasta una planta de reciclado.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

El término mezcla bituminosa en caliente define los materiales resultantes de la combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, fabricados y puestos en obra a una temperatura superior a la ambiente.

Dentro de las mezclas bituminosas en caliente existen diferentes tipos de mezclas cuya composición y propiedades han sido modificados en función de su uso en el firme, distribuyendo entre mezclas para capas de base, intermedia y rodadura.

En España, para la ejecución de este tipo de capas se utilizan hormigones asfálticos de granulometría continua, tipo densa, semidensa y gruesa según el artículo 542 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3), y mezclas de granulometría discontinua o con un alto contenido de huecos, especialmente para capas de rodadura, artículo 543 del PG-3.

Todas estas mezclas tienen unas especificaciones similares para los materiales que las componen: áridos y ligantes bituminosos y unas propiedades y un criterio de diseño diferente en función de su uso en el firme. Por ello, en este apartado se recogen primero las especificaciones para los materiales y luego las de las mezclas de acuerdo con su ubicación en el firme, mezclas para capas de base, intermedia y rodadura.

2.1.1. *Materiales*

2.1.1.1. Áridos

Los áridos constituyen el esqueleto mineral de las mezclas, han de ser resistentes a la fragmentación y al desgaste que pudiera ocasionar el tráfico. Por ello, han de provenir del machaqueo de rocas duras, no meteorizables, tener buena forma, y ser resistentes a la rotura y degradación por el efecto abrasivo y de trituración del tráfico, propiedad considerada por medio del coeficiente de desgaste de Los Ángeles. Además, en el caso de ser empleados en capa de rodadura, las partículas de los áridos han de tener una elevada resistencia al pulimento, evaluado a partir de su coeficiente de pulimento acelerado (CPA).

El árido fino ha de ser no plástico y provenir del machaqueo de rocas de buena calidad, cuyo coeficiente máximo de desgaste sea menor o igual que 25 o 30, según el tipo de mezcla y categoría de tráfico. El polvo mineral deberá ser de aportación, o proveniente del machaqueo de los áridos, con el fin de tener unas partículas no hidrófilas, que se mezclen bien con el betún, para obtener un buen mastic. Para conseguir este fin las partículas han de ser finas y no plásticas.

Las especificaciones de la Tabla 1 hacen referencia a todos los tipos de mezclas recogidas en el PG-3, artículo 542, mezclas tipo hormigón bituminoso (AC) y artículo 543, mezclas para capas de rodadura (BBTM y PA). En la tabla se recogen las diferencias de especificaciones para estas mezclas que tienen lugar, principalmente, por la categoría de tráfico y, a veces, por el tipo de mezcla.

TIPO DE MEZCLA			CAPA	AC								PA y BBTM									
CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				T00	T0	T1	T2	T31	T32	Arcén	T41	T42	T00	T0	T1	T2	T31	T32	Arcén	T41	T42
COMBINADO (antes secado, incluido polvo mineral)	INDICIA	Equivalente de arena UNE-EN 933-8. Azul de metileno UNE-EN 933-9		EA > 50 ó EA > 40 y AM < 10								EA > 50 ó EA > 40 y AM < 10									
ÁRIDO GRUESO (retenido 2 mm)	TEXTURA Y FORMA	Proporción mínima de partículas trituradas (% en masa) UNE-EN 933-5	Rodadura	100		90		75		PA		100		90		75					
			Intermedia	100		90		75		BBTM		100		90		75					
			Base	100		90		75													
		Máximo índice lajas UNE-EN 933-3	Todas las capas	20		25		25*		PA		20		25							
	CALIDAD	Máximo coeficiente de desgaste de Los Angeles UNE-EN 1097-2	Rodadura	20		25		25*		PA		15		20		25					
			Intermedia	25		30		30		BBTM A		15		20		25					
			Base	25		30		30		BBTM B		15		20		25					
	LIMPIEZA	Mín. CPA. UNE -EN 1097-3	Rodadura	56		50		44				56		50		44					
		Máximo contenido de finos (%) UNE-EN 933-1			0,5		0,5						0,5		0,5						
		Máximas impurezas (%) UNE 146130 anexo C			0,5		0,5						0,5		0,5						
FINO (pasa 2 mm, retenido 0,083 mm)	PROPORCIÓN DEL ÁRIDO FINO NO TRITURADO (%)		0		10		10		BBTMA		0		10		10		BBTMB		0		
	LIMPIEZA		Exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas y otras materias extrañas		Exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas y otras materias extrañas		Exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas y otras materias extrañas				Exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas y otras materias extrañas		Exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas y otras materias extrañas		Exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas y otras materias extrañas						
	CALIDAD	proveniente trituración de rocas con un Máximo CDA UNE-EN 1097-2	Rodadura	25		25		25				25		25		25					
			Intermedia	25		30		30				25		30		30					
	GRANULOMETRÍA		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%				Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%				
POLVO MINERAL (pasa 0,083 mm)	FINURA Y ACTIVIDAD	Densidad aparente NLT-176 (g/cm³)	Comprendido entre 0,5 - 0,8		Comprendido entre 0,5 - 0,8		Comprendido entre 0,5 - 0,8				Comprendido entre 0,5 - 0,8		Comprendido entre 0,5 - 0,8		Comprendido entre 0,5 - 0,8						

Tabla 1 Especificaciones para materiales granulares para mezclas bituminosas (Art. 542, 543, PG-3).

2.1.1.2. Ligantes bituminosos

El ligante bituminoso es el principal componente de la mezcla bituminosa ya que es el que aglomera los áridos y da cohesión y estabilidad a la mezcla.

Tiene unas cualidades y unas características que lo hacen muy diferente de los otros tipos de

agentes cohesivos utilizados en carreteras, como por ejemplo los conglomerantes hidráulicos. A diferencia de estos, que proporcionan a los materiales con ellos tratados una elevada resistencia y rigidez, proporcionan uniones tenaces y flexibles. Esto es debido a la respuesta visco-elástica del betún, que varía con la temperatura y la velocidad de aplicación de carga, lo que le permite comportarse, por una parte, como un material flexible con bajo módulo y alta deformabilidad, que se adapta a las deformaciones y asentos del firme y absorbe las tensiones debidas a las retracciones térmicas del firme sin fisurarse (los pavimentos flexibles no necesitan juntas) y, por otra, como un material estable y tenaz, con un alto módulo y respuesta elástica frente a las cargas del tráfico.

Al cambiar el comportamiento del betún con la temperatura, es necesario emplear, en cada caso y con cada mezcla, ligantes bituminosos que estén de acuerdo con el rango de temperaturas a que estará sometida la mezcla en el firme. Cuando la temperatura del pavimento alcanza valores próximos a la temperatura de anillo y bola del betún (punto de reblandecimiento), la mezcla suele perder su estabilidad. En el otro extremo, cuando la temperatura de la carretera desciende por debajo de la temperatura de fragilidad del betún, la mezcla se hace muy frágil y se fisura con facilidad. En el caso de la normativa española se tienen seis tipos de betunes cuyo rango de viscosidades y propiedades se adapta a las necesidades de los diferentes tipos de mezcla, condiciones climatológicas y unidades de obra de carretera empleadas en España: B13/22, B40/50, B60/70, B80/100, B150/200 y B200/300.

En la Tabla 2 se recogen las especificaciones españolas para estos seis tipos de betunes asfálticos y en ella puede observarse cómo son básicamente los parámetros: penetración y punto de reblandecimiento, antes y después de envejecimiento, los que definen las características de cada grupo de betunes.

Las especificaciones de estos ligantes se recogen en dos normas europeas la UNE EN 12591 que incluye las especificaciones de todos los betunes asfálticos a excepción de los betunes de alto módulo, y la UNE EN 13924 que incluye las especificaciones de estos últimos. En ambas normas se recogen un amplio rango de betunes de distintas características figurando en los "Anexos nacionales" aquellos que son de mayor uso en los distintos países. En la tabla siguiente se recogen los grados más utilizados en la construcción de carreteras en España.

Los betunes de penetración indicados en la tabla 542.1 del PG-3, cuyas especificaciones se recogen en el artículo 211, podrán ser sustituidos por betunes que cumplan con los tipos, las especificaciones y las condiciones nacionales especiales de la norma europea UNE-EN 12591 (Tabla 2).

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Análisis del ciclo de vida de Mezclas Bituminosas Semiclientes con árido reciclado

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMA NLT	B 13/22		B 40/50		B 60/70		B 80/100		B 150/200		B 200/300	
			Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
BETÓN ORIGINAL														
PENETRACIÓN (25 °C; 100g; 5s)	0,1 mm	124	13	22	40	50	60	70	80	100	150	200	200	300
ÍNDICE DE PENETRACIÓN		181	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO ANILLO Y BOLA	°C	125	60	72	52	61	48	57	45	53	38	45	34	41
PUNTO DE FRAGILIDAD FRASS	°C	182		+1		-5		-8		-10		-15		-20
DUCTILIDAD (5cm/min)	a 15°C	cm	126											100
	a 25°C			10	70	90	100	100						
SOLUBILIDAD EN TOLUENO	%	130	99,5		99,5		99,5		99,5		99,5		99,5	
CONTENIDO EN AGUA (en volumen)	%	123		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	127	235		235		235		235		220		175	
(*) DENSIDAD RELATIVA (25°C/25°C)		122	1,0		1,0		1,0		1,0		1,0		0,99	
RESIDUO DESPUÉS DE PELÍCULA FINA														
VARIACIÓN DE MASA	%	185		0,5		0,8		0,8		1,0		1,4		1,5
PENETRACIÓN (25°C; 100g; 5s)	% p.o.	124	60		55		50		45		40		35	
VARIACIÓN DEL PUNTO DE REBLANDECIMIENTO ANILLO Y BOLA	°C	125		7		8		9		10		11		12
DUCTILIDAD (5 cm/min)	a 15°C	cm	126											100
	a 25°C			5	40	50	75	100						

Tabla 2 Especificaciones para betunes asfálticos (Art. 211, PG-3).

Estas especificaciones no suponen cambios significativos frente a las recogidas actualmente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Solamente cambian las denominaciones (se amplían los rangos de penetración) y algunos ensayos que no modificarán la calidad de los productos utilizados actualmente en nuestras carreteras.

En cuanto a la realización de los ensayos, éstos se realizarán de acuerdo a las normas UNE EN correspondientes.

En la Tabla 3 podemos observar la denominación y características correspondientes a la normativa europea, y la denominación de la norma anterior (NLT) que aparece como norma actual en la tabla.

Denominación actual			B 13/22	B 40/50	B 60/70	B 80/100	B 150/200
Denominación UNE EN			B 15/25	B 35/50	B 50/70	B 70/100	B 160/220
Característica	Unidad	Norma					
Penetración a 25°C	0,1 mm	EN 1426	15 - 25	35 - 50	50 - 70	70 - 100	160 - 220
Punto de Reblandecimiento	°C	bEN 1427	60 - 70	50 - 58	46 - 54	43 - 51	35 - 43
Punto de Inflamación	°C	EN ISO 2592	≥ 245	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Solubilidad	%	EN ISO 12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
Índice de Penetración		Anexo A	-1,5 a + 0,7	-1,5 a + 0,7	-1,5 a + 0,7	1,5 a + 0,7	-1,5 a + 0,7
Punto de Fragilidad Fraass	°C	EN ISO 12593	≤ 3	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -15
Resistencia al endurecimiento a 163°C en 12607-1							
Variación de masa	%		≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 1,0
Penetración Retenida	%		≥ 55	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 36
Incremento del Punto de Reblandecimiento	°C		≤ 10	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 12

Tabla 3 Especificaciones betunes asfálticos (UNE EN 12591).

2.1.2. Mezclas en capa de rodadura

Se definen como mezclas bituminosas en caliente para capas de rodadura, aquéllas cuyos materiales son la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos en granulometría continua, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación obliga a calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

A través de estas mezclas se disponen en obra entre el 80 y el 98%, variando de país a país, de las capas empleadas en carreteras.

La proporción de partículas total y parcialmente trituradas del árido grueso, según la UNE-EN 933-5, se encuentra entre el 100% y el 75% en función de la categoría del tráfico pesado.

La designación de las mezclas bituminosas seguirá por lo tanto el esquema siguiente:

AC D surf / binder / base ligante granulometría

Donde:

AC: indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso.

D: tamaño máximo del árido, abertura del tamiz que deja pasar entre 90% - 100% del total.

Surf / Binder / Base: se indicará con estas abreviaturas si la mezcla se va a emplear en capa de rodadura, intermedia o base, respectivamente.

Ligante se debe incluir la designación del tipo de ligante hidrocarbonado utilizado.

Granulometría: se indicará para una mezcla densa (D), semidensa (S) o gruesa (G)

Se define como mezcla bituminosa en caliente tipo hormigón bituminoso la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) con granulometría continua y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Las mezclas drenantes, aquellas que por su baja proporción de árido fino, presentan un contenido muy alto de huecos interconectados que le proporcionan características drenantes. Se emplearán en capas de rodadura de cuatro a cinco centímetros (4 a 5 cm) de espesor.

Las mezclas discontinuas son aquéllas cuyos áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso. Se distinguen dos tipos de mezclas bituminosas discontinuas con dos husos granulométricos con tamaño máximo nominal de ocho y once milímetros (8 y 11 mm) cada uno. Con cada huso granulométrico podrán fabricarse mezclas bituminosas discontinuas en caliente, para capas de rodadura de dos a tres centímetros (2 a 3 cm) de espesor.

La ejecución de cualquier tipo de mezcla bituminosa en caliente de las definidas anteriormente incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
- Fabricación de la mezcla de acuerdo con la fórmula de trabajo.
- Transporte de la mezcla al lugar de empleo.
- Preparación de la superficie que va a recibir la mezcla.
- Extensión y compactación de la mezcla.

2.2. MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES Y CON RAP

2.2.1. *Introducción*

Las técnicas de realización de mezclas asfálticas a bajas temperaturas han despertado a lo largo de esto últimos años un enorme interés y el motivo de mayor peso ha sido la creciente concienciación que estamos experimentando para lograr los objetivos del Protocolo de Kyoto en cuanto a reducción de emisiones en todas las industrias.

El empeño de acabar con la problemática que genera Cambio Climático, las emisiones de CO₂, la energías alternativas ante un, cada vez más cercano, escenario sin reservas de energías fósiles han hecho que los diferentes actores relacionados con la construcción y conservación de carreteras estén aplicando medidas de modo que esta industria sea lo menos pernicioso con el Medio Ambiente.

A los fabricantes de mezclas asfálticas, a las Administraciones de Carreteras y a las empresas fabricantes de ligantes hidrocarbonados esta concienciación los ha obligado a recomendar y poner a punto productos y técnicas de fabricación con las que trabajar las mezclas asfálticas a unas temperaturas, más bajas que las convencionales.

La sostenibilidad es una de las grandes preocupaciones dentro del sector de la ingeniería a día de hoy. Las mezclas semicalientes y las realizadas con material reciclado (RAP) son dos de las técnicas más importantes actualmente. Los efectos de reducción de la temperatura, provocan una mejora de la fase de compactación, y la posibilidad de añadir RAP en mayor porcentaje. El RAP es el principal producto reciclado de los productos de aquellas pavimentaciones afectada de daños debido al envejecimiento y su utilización permite reducir en árido virgen y demanda de mezcla asfáltica nueva. Como contrapunto, cabe destacar que las tecnologías de reducción de temperatura pueden aumentar la susceptibilidad al agua y el RAP aumenta significativamente la rigidez de la mezcla resultante. Como consecuencia, el rendimiento de calidad de los pavimentos sostenibles puede requerir un uso combinado de mezclas semicalientes y RAP para conseguir suficiente rigidez y resistencia a la humedad y a la fractura.

En lo que respecta a la eficiencia, las mayores inversiones en maquinaria (Fig. 2) y los significativos incrementos de costes de la mano de obra, hacía que la mejora del rendimiento, debiendo hacer frente a mayores consumos energéticos, pareciera la forma más eficiente de mejorar la actividad. Dentro de esta materia, los equipos y la tecnología en caliente se han exhibido imbatibles incluso en los momentos en los que los precios de los combustibles se han disparado.

Paralelamente, las tecnologías semicalientes no habían sido capaces de ofrecer mezclas con características mecánicas similares a las de caliente y, por tanto, su campo de aplicación sea mantenido relegado al de las vías de baja intensidad de tráfico (riegos con gravilla especialmente) y al de las operaciones de rehabilitación superficial (riegos y lechadas). Únicamente en puntuales actuaciones se proyectan (con técnicos que conocen bien las peculiaridades de estas mezclas) y ejecutan (con contratistas que conocen el oficio) obras con mezclas abiertas en frío y gravaemulsiones.



Fig. 2 Las tecnologías en caliente han seguido un proceso de desarrollo y mejora de los rendimientos y las calidades (Fuente: Bardesi, et al.).

La situación ha permanecido inmóvil pese a varios intentos en los que se perseguía mejorar la calidad de las mezclas fabricadas con emulsión calentando los áridos hasta temperaturas que oscilaban entre los 75 y los 90°C hecho que facilitaba la envuelta y acortar los tiempos de

maduración. Esa ha sido la eclosión de lo que actualmente conocemos como mezclas templadas. Además se han empleado en ocasiones, mezclas cerradas en frío en las que la arena se envolvía con un porcentaje de betún en planta en caliente y después se mezclaba junto con los gruesos y la emulsión en una planta en frío.

En la última década, aunque en los países con mayor preocupación por las cuestiones ambientales y laborales se viene hablando de esto desde hace bastante más tiempo, se está produciendo un cambio muy significativo en la manera de entender el campo de las mezclas y todo lo que lo rodea. Hablamos de tecnologías sostenibles (Fig.3). El cambio va ligado a aspectos de lo más diverso aunque que tienen como nexo entre ellos dos aspectos fundamentales:

- La presión social y política en materias referentes al medio ambiente, por la obligación de contribuir al desarrollo sostenible y además por un motivo de mayor complejidad de comprensión, y es que la factibilidad de encontrar eficiencias y ahorres de coste tomando medidas medioambientales.
- La presión social y sindical para mejorar las condiciones del entorno de trabajo de los operarios del sector. Llevado a la práctica a través de la reducción de las temperaturas durante los procesos de producción y puesta en obra.

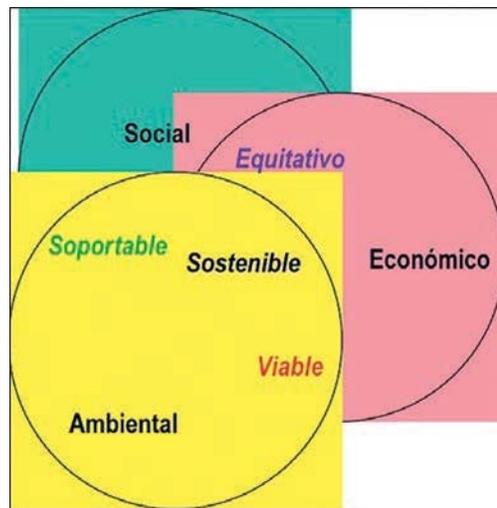


Fig. 3 Esquema conceptual de sostenibilidad (Fuente: Bardesi, et al.).

En la actualidad se están realizando esfuerzos muy destacables en las diversas escalas para desarrollar productos que optimicen el empleo de los recursos y reduzcan el impacto ambiental y laboral de las tareas vinculadas con las mezclas bituminosas. Esta corriente, surge en Europa, más concretamente en los países nórdicos, y ya es una realidad también en Norteamérica y, en poco tiempo, se extenderá por todo el mundo.

La consecuencia de esto, ha supuesto la creciente implicación empresarial en lo relativo al ahorro energético, disminución de emisiones, salud laboral, etc., de modo que en cualquier tipo de industria se mira con lupa cualquier producto o técnica capaz de afectar al medio ambiente y la seguridad de las personas.

En efecto, el impacto del sector de las mezclas asfálticas en caliente sobre el medio ambiente no

es baladí, en modo alguno. Dejando de lado los impactos producidos durante los procesos de fabricación de componentes (áridos y ligantes) y equipos (maquinaria) que son comunes a otras alternativas (áridos y maquinaria) o forman parte inseparable de procesos más complejos (betunes dentro del esquema de producción de una refinería), el proceso de manufacturado de mezclas en caliente conlleva un consumo energético nada despreciable que genera un gran volumen de emisiones de gases de efecto invernadero, y otros.

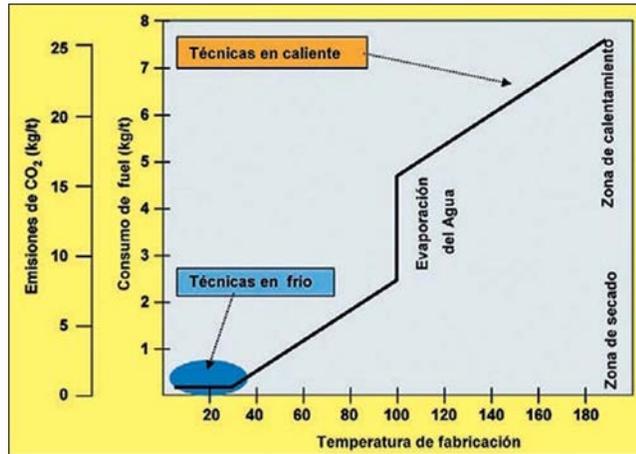


Fig. 4 Temperatura de fabricación y consumo de combustibles en las técnicas habituales (Fuente: Bardesi, et al.).

El consumo habitual de combustible (Fig.4) para la producción de una tonelada de mezcla en caliente se sitúa alrededor de los 6-7 kg, de los que aproximadamente un 30-35% son pérdidas, un 30-25% corresponden al calentamiento de los áridos gruesos y finos y un 15% a la evaporación del agua.

Lo que para un combustible medio supone una emisión de 3-3,5 kg de CO₂ por kg de combustible consumido.

De este modo, la producción española del 2008, alrededor de los 40 Mt, habría generado durante el proceso productivo del orden de un millón de toneladas de CO₂. Este valor, de por sí puede no significar mucho, pero equivale a las emisiones de 500.000 coches medios haciendo 15.000 km/año. Junto con CO₂, durante el proceso, se emiten otros gases: CO, NO_x, SO_x, VOC (hidrocarburos volátiles) y, por supuesto, polvo.

El sector, además, posee otra forma de impacto ambiental que es el vertido de mezclas fresadas en operaciones de rehabilitación de firmes. Efectivamente esta problemática que está ya perfectamente enfocado y, aunque en este momento los ratios de mezclas recicladas distan de estar en niveles óptimos, nadie duda que las técnicas de reciclado desarrolladas (Fig. 5) y la normativa actual deben permitir reutilizar el 100% de los materiales bituminosos fresados.

Al contrario, el sector de mezclas asfálticas tiene mucho que aportar a la solución de las problemáticas ambientales, en concreto el reciclado y valorización de material de subproductos industriales (áridos siderúrgicos, p.ej.) o de residuos convenientemente tratados (residuos de demolición, neumáticos, plásticos, aceites, etc.), de los cuales, muchos, ya son objeto de medidas legislativas recientes.

Allí donde el progreso se augura más prometedor es en materia de fabricación y puesta en obra

de mezclas bituminosas donde la aparición de un amplio abanico de nuevas técnicas permiten una reducción importante del consumo energético (Fig.5) y de las emisiones de gases de efecto invernadero pues se llega a trabajar a temperaturas cercanas a los 100 °C con betunes convencionales. Todo estos, sin dejar de lado las técnicas antiguas con emulsión bituminosa que están volviendo a tener protagonismo al ser las menos contaminantes de todas.

Se analizará los ahorros energéticos según las técnicas de las que estemos hablando, cuales son las que reducen más las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero o aquéllas que reducen los riesgos laborales. Esta será una singladura sin vueltas atrás y que requerirá valorar detenidamente en cada caso no sólo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista ambiental.



Fig. 5 Planta para reciclado en caliente de alta tasa y acopio de RAP.

2.2.2. Sistemas que reducen la temperatura

La reducción de las temperaturas de producción y puesta en obra de mezclas asfálticas (incluyendo reciclados) y, por tanto, del consumo energético y de las emisiones, puede conseguirse por diferentes vías:

- Aditivación del betún.
- Espumación del betún.
- Incorporación de materiales específicos en el proceso de mezclado.
- Modificando las técnicas de fabricación de las mezcla.
- Empleo de emulsión bituminosa (vía tradicional o en planta en caliente).

No es fácil hacer una clasificación de las técnicas. Un modo muy extendido es en base a la temperatura de fabricación (Fig.6):

- Mezclas **Semiclientes**, (warm mixes, en inglés; o enrobés tièdes, en francés) para las mezclas fabricadas por encima de 100°C y con un límite superior de unos 140°C.

- Mezclas **Templadas** (Half-Warm mixes, en inglés; o enrobés semi-tièdes, en francés) para las mezclas fabricadas por debajo de 100°C y con un límite inferior de unos 60°C.
- Mezclas **en Frío** (Cold mixes, en inglés; o enrobés à froid, en francés) para las mezclas fabricadas a temperatura ambiente, esto es, sin calentar áridos ni ligantes.

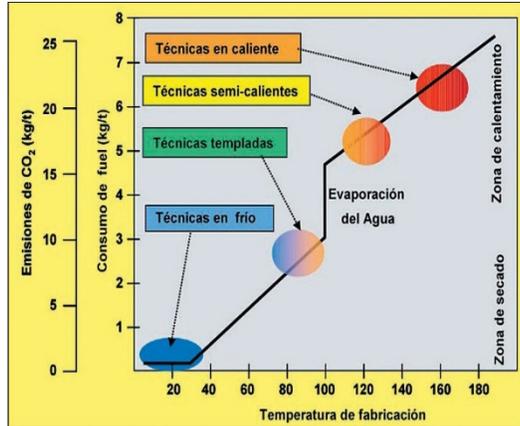


Fig. 6 Temperaturas de fabricación y consumos de combustible (Fuente: Bardesi, et al.).

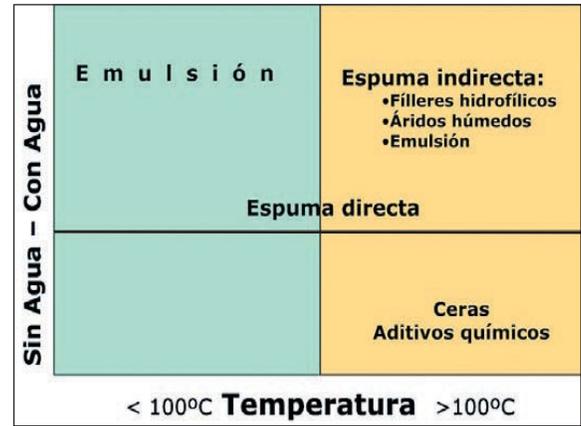


Fig. 7 Ligantes empleados en los nuevos sistemas.

Entre ellas existe una diferencia fundamental, y es que en las mezclas templadas la fase de calentamiento no llega a los 100°C y no se pretende secar totalmente el árido, con lo que se logra reducir más el consumo de combustible (por la menor temperatura y porque se evita el calor latente de vaporización). Las mezclas templadas se producen habitualmente entre 70 y 95°C mientras que las semicalientes normalmente se fabrican entre 20 y 30°C por debajo de las mezclas en caliente convencionales. Sin embargo, algunos de los tipos de mezclas semicalientes que serán mencionados más adelante están a caballo de ambas técnicas pues emplean sistemas en los que parte del árido se seca y parte se introduce a temperatura ambiente.

Otra característica importante es el tipo de ligante empleado: betún, emulsión o espuma de betún (Fig.7). En las mezclas templadas se emplean emulsiones y, eventualmente, espuma de betún. En las mezclas semicalientes se emplea betún o betún modificado y también, en ocasiones, espuma de betún, a veces mezclada con betún. Aun es bastante común, como veremos a continuación, inducir la autoespumación del betún mediante la adición de agua al sistema.

En lo referente a los tipos granulometría de estas mezclas, el más habitual en las mezclas semicalientes ha sido emplear las del tipo AC (Tab.4). Es reseñable además el éxito de esta tecnología de mezclas en reciclados templados realizados al 100 % de RAP.

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Análisis del ciclo de vida de Mezclas Bituminosas Semicalientes con árido reciclado

TIPO DE MEZCLA			CAPA	AC								PA y BBTM										
CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				T00	T0	T1	T2	T31	T32	Arcoén	T41	T42		T00	T0	T1	T2	T31	T32	Arcoén	T41	T42
COMBINADO (antes secado, incluido polvo mineral)	INDICIA	Equivalente de arena UNE-EN 933-8. Azul de metileno UNE-EN 933-9		EA > 50 ó EA > 40 y AM < 10								EA > 50 ó EA > 40 y AM < 10										
			TEXTURA Y FORMA	Proporción mínima de partículas trituradas (% en masa) UNE-EN 933-5	Rodadura	100		90		75		PA		100		90		75				
Máximo índice lajas UNE-EN 933-3	Intermedia	100		90		75		BBTM		100		90		75								
	Todas las capas	PA		20		25				BBTM		20		25								
CALIDAD	Máximo coeficiente de desgaste de Los Angeles UNE-EN 1097-2	Rodadura		20		25				PA		15		20		25						
		Intermedia	25				25*		BBTMA		15		20		25							
		Base	25		30				BBTMB		15		25									
	Mín. CPA. UNE-EN 1097-3	Rodadura	56		50		44				56		50		44							
LIMPIEZA	Máximo contenido de finos (%) UNE-EN 933-1		0,5								0,5											
	Máximas impurezas (%) UNE 146130 anexo C		0,5								0,5											
FINO (pasa 2 mm, retenido 0,083 mm)	PROPORCIÓN DEL ÁRIDO FINO NO TRITURADO (%)		0		10				BBTMA		0		10				BBTMB		0			
	LIMPIEZA		Exento de terrones de arcilla, material vegetal, marga y otros materiales extraños								Exento de terrones de arcilla, material vegetal, marga y otros materiales extraños											
	CALIDAD	Proveniente trituración de rocas con un Máximo CDA UNE-EN 1097-2	Rodadura Intermedia	25								25										
			Base	30																		
GRANULOMETRÍA		Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%								Material que pase el tamiz # 2 mm = 100%, Material que pase el tamiz # 0,125 = entre 85 y 100, Material que pase el tamiz # 0,083 = entre 70 y 100. Ancho máximo del huso 10%												
POLVO MINERAL (pasa 0,083 mm)	FINURA Y ACTIVIDAD	Densidad aparente NLT-176 (g/cm³)	Comprendido entre 0,5 - 0,8								Comprendido entre 0,5 - 0,8											

Tabla 4 Especificaciones para materiales granulares para mezclas bituminosas.

En primer lugar, en todos los casos el objetivo esencial es producir mezclas que cumplan los estándares de calidad de las especificaciones, por ejemplo los artículos 542 y 543 del PG•3, fabricando a temperaturas sensiblemente inferiores a las habituales. Ello no implica obligatoriamente fabricar exactamente lo mismo que con las mezclas en caliente. Por su concepción, algunos de los sistemas propuestos pueden requerir cambios, a veces relevantes, en la composición de las mezclas y maneras de trabajo algo diversas de las habituales pero también perfectamente válidas.

En cualquier caso el método seguido, los objetivos perseguidos fabricando con este tipo de mezclas son:

- Medioambientales:
 - Ahorro energético.

- Disminución de las emisiones de gases (Fig.8).
- De seguridad:
 - Mejores condiciones de trabajo, seguridad y salud laboral.
 - Ausencia/disminución de partículas en suspensión.

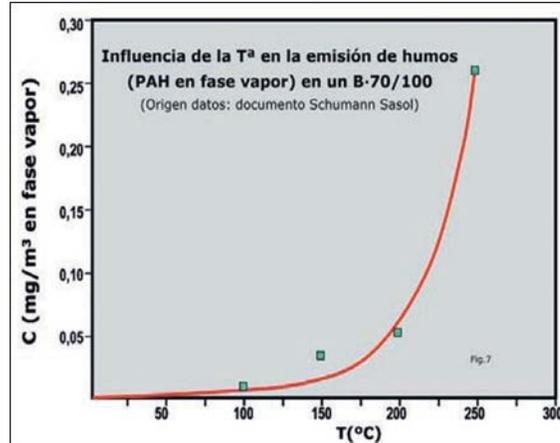


Fig. 8 Disminución de las emisiones de gases.

- De calidad:
 - Mezclas más uniformes con menor segregación.
 - Mejor trabajabilidad (juntas, compactación, etc.).
 - Menor envejecimiento de los ligantes.
- Económicos:
 - Menor gasto en conservación de las instalaciones.
 - Ampliación de la temporada/jornada de aplicación.
 - Almacenamiento en silos por mayor período de tiempo.

2.2.2.1. Sistemas de mezclas semicalientes

Dentro de los sistemas para producir mezclas semicalientes se distinguen dos grandes conjuntos, según que incorporen, o no, algo de agua al sistema para producir una espumación del betún.

2.2.2.1.1. **Sistemas semicalientes sin agua**

Los que no añaden agua, recurren a la incorporación de aditivos químicos o a la de ceras. Dentro de los químicos se encuentran productos, como el Iterlow-T®, o el Cecabase RT92 Bio que con pequeñas proporciones, 0,2 % - 0,4 % s/b, y sin modificar la viscosidad del betún ni sus características empíricas y reológicas actúan en la interfase betún/áridos aumentando la fluidez de la mezcla. Generalmente, la incorporación en el betún de estos productos es sencilla, obteniendo con una pequeña agitación o incluso diluyendo en línea durante la carga de cisternas. Además se puede incorporar en la misma planta de mezcla en tanque o en la báscula de betún.

Existen aditivos de mayor complejidad formados por mezclas de ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarburos, polímeros termoplásticos e inhibidores de oxidación de los

denominados químicos que sí modifican la viscosidad del betún lo que permite poder manejar éste a menor temperatura, logrando reducir la T^a de fabricación en unos 30°C y la de compactación incluso por debajo de los 100°C . Se puede incluso incorporar estos aditivos por vía seca (Fig.9) con un equipo móvil de dosificación automático en la planta asfáltica.



Fig. 9 Aditivos para vía seca.



Fig. 10 Mezclas semicaliente con ceras.

Las ceras son otro tipo de producto capaz de reducir la viscosidad del betún son las ceras (Fig.10). Dentro de las cuales existen diferente grupos: Naturales, parafínicas, no parafínicas 100% sintéticas, no parafínicas parcialmente sintéticas, amidas de ácido graso, de polietileno, etc.

Con ellas logramos reducir la viscosidad del ligante en el intervalo de las temperaturas altas y, por consiguiente, la temperatura durante el proceso de producción (mezclado y compactación, alrededor de unos 30°C). Por otro lado, contrariamente, en el intervalo de las temperaturas de servicio las viscosidades se ven aumentadas mejorando notablemente la respuesta plásticas y el módulo de la mezcla comparado al que tendría en el caso de empleo de betún habitual.

La forma de adición convencional es al betún en proporciones del 2,5 al 4%, esto es, en torno al 0,12-0,18% sobre mezcla. La incorporación previa de aditivos al betún es posible que sea una de las maneras más sencillas de producir para el fabricante de mezclas asfálticas ya que no requiere modificar la planta, a excepción de lo relativo a disminuir la temperatura de los áridos entre 20°C y 50°C . Esta técnica han sido probadas con éxito en varias obras del Ministerio de Fomento, CCAA y Ayuntamientos, y hasta existe una experiencia con betunes modificados.

En el gráfico (Fig.11) se aprecia la reducción de la viscosidad del betún con aditivo en comparación a un B 60/70 convencional. Se observa que a partir de 90°C hay una variación de tendencia en la curva de viscosidad, gracias al cual se trabaja la mezcla a temperaturas más baja

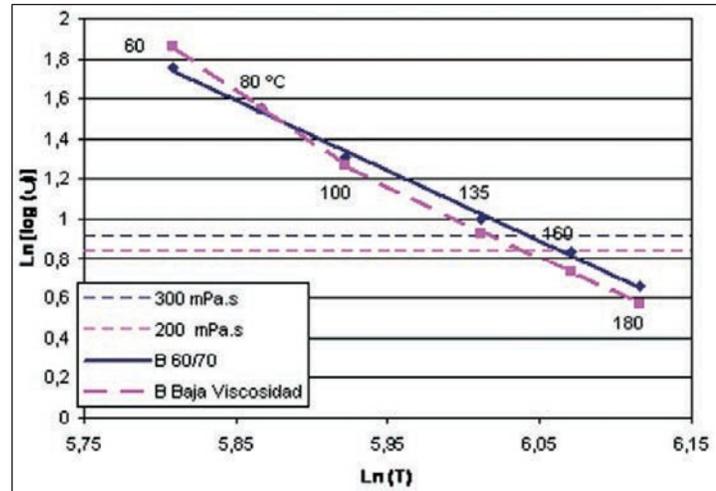


Fig. 11 Relación viscosidad-temperatura (Fuente: Bardesi, et al.).

2.2.2.1.2. Mezclas semicalientes con incorporación de agua

La suma de pequeñas fracciones de agua a una mezcla bituminosa en caliente tiene dos intenciones: producir la espumación del betún facilitando la envuelta del árido y reducir el rozamiento entre partículas minerales simplificando la compactación. La sinergia conseguida a través de ambos efectos permite reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra para obtener, si todo marcha bien, mezclas con características similares a las obtenidas en mezclas convencionales en caliente.

Contamos con varios métodos para incorporar agua al sistema que podemos agrupar en:

- Inducir la espumación incorporando al mezclador un filler hidrofílico.
- Inducir la espumación incorporando, al mezclador, áridos parcialmente húmedos.
- Inyectar espuma directamente al mezclador.

Filleres hifrofílicos

Existe varios productos, aunque el más difundido es la zeolita que es un aluminosilicato. Su uso se ha extendido desde mediados de los noventa en Alemania. Hoy en día las zeolitas sintéticas más populares son las denominadas Aspha-min®, que emplea Eurovia, y Advera® de PQ Corporation.

La zeolita sintética (Fig.12) posee en su forma cristalina alrededor de un 20-25 % de agua, motivo por el cual al añadirse, en pequeñas proporciones (0,3 % s/a), a los áridos calientes (alrededor de 130°C) justo antes del proceso de envuelta liberan el agua en forma de vapor. Se genera un efecto de “espumado”, incrementado el volumen del ligante, y permitiendo la envuelta a temperaturas más bajas de las convencionales. Con este sistema conseguimos reducir la temperatura de aplicación de la mezcla entre 20°C – 30°C lo que puede suponer un ahorro de 1 a 3 litros de combustible por tonelada de mezcla, lo que puede representar un - 20 %, -30% del consumo total de una mezcla a 160°C.

Incorporación de áridos húmedos al mezclador

El caso del mezclado secuencial con espumación inducida es el más extendido. Cuenta con tres versiones:

- Método EBE®: Enrobé Basse Energie. Se secan y calientan hasta unos 140°C los áridos gruesos y parte de la arena. Se envuelven con todo el betún que se inyecta a 170°C. Se añade el resto de la fracción fina, fría y húmeda, induciéndose la espumación llegándose a una temperatura final de unos 100°C y manteniendo la mezcla una humedad residual para la puesta en obra.
- Método EBT®: Enrobé Basse Température. Se calienta el árido hasta los 100°C, no está totalmente seco. Puede incorporarse agua para llevar al sistema a una humedad (1-1,5%) que asegure la espumación. Se introduce el betún a 170°C y se forma la espuma. La mezcla termina a unos 95°C y manteniendo una humedad residual para la puesta en obra.
- Método EBT®-2. En esta variante del anterior, se secan los áridos gruesos y parte de la arena hasta unos 130-150°C. A continuación se introduce la arena húmeda de forma que la mezcla se sitúa a unos 100°C. Se incorpora el betún a 170°C, formándose la espuma que permite la envuelta. Si es preciso, antes del betún, se añadirá el agua precisa (humedad del 1- 1,5%) para conseguir la espumación del betún. El resto es igual al anterior.

Existe la opción de incorporar a la mezcla un 0,5% de un mejorador de adhesividad antes del mezclado.

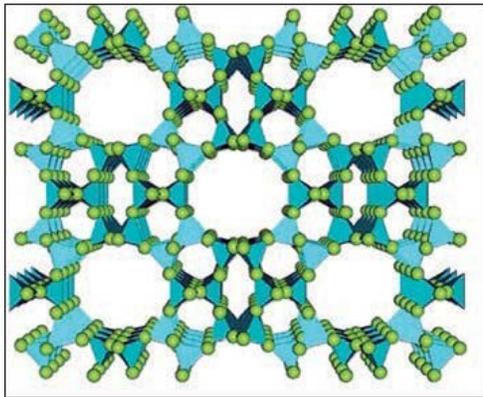


Fig. 12 Esquema de zeolita.



Fig. 13 Fabricación de mezcla semicaliente por espumación inducida.

Principalmente, estos sistemas pueden ser utilizados en cualquier tipo de planta (Fig. 13), continua o discontinua, a las que deberá adaptarse una línea para la introducción del agua y otra para el aditivo. Sin embargo, debe tenerse presente que para ello es preciso poder regular los quemadores para ajustar las temperaturas de los áridos bastante por debajo de las temperaturas habituales de trabajo. La temperatura final de la mezcla es inferior a 100°C y presenta un aspecto similar a una mezcla en caliente convencional pero sin emisión de humo.

Incorporación directa de espuma betún

Se trata de una técnica antigua, años 50, ampliamente utilizada en algunos países como Canadá pero que en Europa (se ha realizado alguna obra de reciclado en Noruega, Gran Bretaña y Países

Bajos) y, más en concreto, en España es una técnica que continúa casi en periodo de experimentación.

La espuma es otra posibilidad que tenemos de aplicar un betún en carretera a temperaturas más bajas de las usuales a las que se aplican las mezclas en caliente.

El proceso de espumación (Fig.14) es a priori simple y se produce al inyectar, a presión, agua, en cantidades pequeñas (aproximadamente un 2%), en el betún caliente. A la salida del conducto el betún se expansiona aumentando su volumen unas 10-20 veces produciéndose la espumación de éste con la que fácilmente se consigue envolver los áridos. La efectividad del proceso de espumación se valora a través de 3 parámetros:

- Tasa de Expansión Máxima, (corresponde a la mayor expansión volumétrica).
- Relación de Expansión (la relación existente entre el volumen máximo alcanzado por la espuma y el inicial del betún después de un tiempo definido).
- Vida media: el tiempo en segundos que tarda la espuma en perder el 50 % del volumen máximo alcanzado. Valores típicos pueden estar comprendidos entre 40 y 80 segundos. Es la medida de la estabilidad de la espuma.

Cuanto mayor sea el tiempo de expansión lograremos que la mezcla con los áridos sea mejor.

Para el estudio en laboratorio de mezclas con espuma de betún se emplean mini plantas (Fig.16) que reproducen de una forma bastante fidedigna las condiciones industriales.

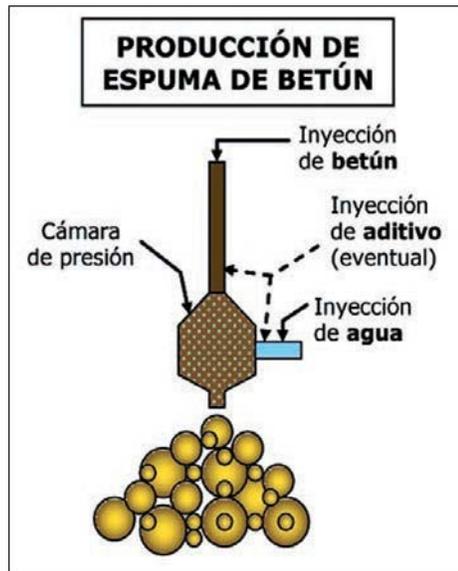


Fig. 14 Espumación del betún.



Fig. 15 Planta de laboratorio de espuma de betún.

Hemos visto que la incorporación de cal hidratada o de cemento mejora notablemente la resistencia al agua de estas mezclas fabricadas con espuma-betún.

A efectos de su aplicación en mezclas semicalientes se han desarrollado dos metodologías:

- Mezclas con betún y espuma. Se denomina WAM-Foam Process y no utiliza ningún tipo de aditivos. Patentado por Shell. El procedimiento consiste en calentar los áridos

(sin filler) a unos 130°C y se mezcla primero con un ligante blando (25% del total) y después el ligante duro que se incorpora espumado (inyección en línea de un 2-5% de agua fría al betún a 180°C).

- Envuelta en doble tambor (Fig.16), la técnica se desarrolla en las plantas de doble tambor a las que se añade en el tambor exterior de mezclado un grupo de inyectores por los que se incorpora la espuma de betún. El árido se calienta hasta los 135- 140°C, se mezcla con la espuma en el tambor exterior y puede compactarse hasta los 115°C.

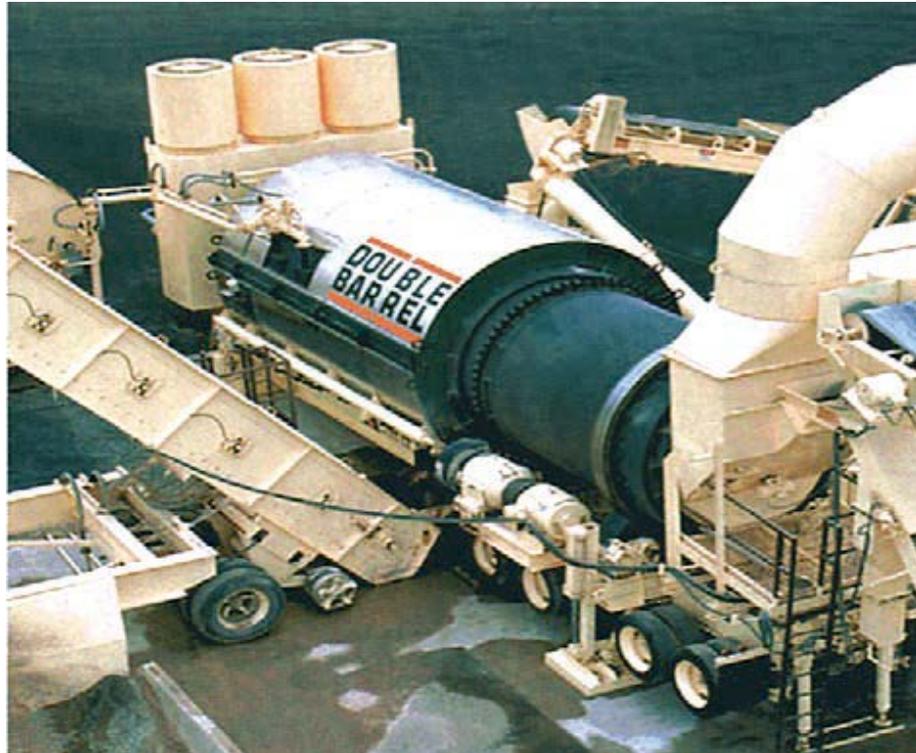


Fig. 16 Planta Astec de doble tambor.

En España no hay experiencias con ninguno de estos procedimientos.

2.2.2.1.3. Estudio de las mezclas semicálidas en el laboratorio

Los ensayos de diseño de estas mezclas en el laboratorio serán los mismos que los utilizados para las mezclas convencionales: sensibilidad al agua, deformaciones plásticas, huecos, densidades, etc.

Habrà que considerar a la hora de fabricar las probetas la temperatura recomendada de fabricación y compactación para acercarse lo más posible a las condiciones de obra, lo que no siempre es posible, especialmente en las técnicas que incorporan agua porque los tiempos de mezclado en laboratorio suelen ser mayores que en los mezcladores de las plantas.

La compactadora giratoria otorga muy buena información de la compacidad alcanzada según los ciclos y las temperaturas de compactación. En este sentido, parece una herramienta casi

indispensable para el desarrollo de estos sistemas en los que uno de los aspectos críticos es la compactación.

Los resultados han de ser, como mínimo, similares a los obtenidos con los betunes convencionales a las temperaturas habituales, 160°C, de fabricación. Pero no necesariamente idénticos. Especialmente, se debe considerar que las menores temperaturas de fabricación hacen que el betún sufra un menor envejecimiento y, por tanto, el ligante final será más blando que en la mezcla en caliente convencional correspondiente. Como consecuencia, son esperables valores algo menores de módulo y deformaciones en pista algo mayores.

2.2.2.1.4. Fabricación y puesta en obra de las mezclas semicalientes

Una vez realizado el estudio en el laboratorio es necesaria una total adaptación de la planta para adaptar los quemadores a la temperatura que queramos calentar los áridos que será la temperatura final, aproximada, de la mezcla.

Los aditivos deben incorporarse al betún, preferentemente, en los puntos distribuidores para que la disolución sea homogénea. El transporte a obra se realiza a través de transporte convencional a la temperatura que recomienda el fabricante.

La maquinaria utilizada en la compactación es la convencional con rodillo metálico con vibración en ambos rodillos y un compactador de neumáticos.

En el extendido en obra se comprobará en un tramo de ensayo previo, la temperatura mínima a la que podemos compactar para conseguir unas características de mezcla de acuerdo con lo obtenido en el laboratorio en cuanto a % de huecos y densidades.

Es fundamental hacer un control de calidad, lo más exhaustivo posible especialmente en las primeras obras siendo conveniente realizar ensayos y comprobaciones de:

- Temperatura de mezclado en planta.
- % de ligante, granulometría y huecos.
- Módulo, fatiga, deformaciones plásticas.
- Recuperación de ligante para ver cómo queda tras el extendido.
- Evolución de la temperatura de compactación y de las densidades in situ.
- Extracción de testigo para su estudio.

2.2.2.1.5. Ventajas medioambientales de las mezclas semicalientes

Entre las ventajas significativas están:

- El ahorro energético (hasta del 50%).
- La reducción de riesgos laborales.
- La disminución de las emisiones de aerosoles y humos.
- El menor envejecimiento del betún y la mejor trabajabilidad de las mezclas.

En base a los sistemas y de los tipos de aditivos utilizados podemos horquillar algunos valores de ahorro energético y disminución de emisiones.

Parámetro	Diferencia
Tª de gases (°C)	- 25 %
CO ₂	-20 %, -25 %
NO _x	-15 %, -25 %
CO	-25 %, -30 %
SO ₂	-15 %, -20 %
Polvo (mg/m ³)	-80 %, -90 %
COV	-18 %, -22 %

Tabla 5 Ahorro energético y disminución de las emisiones de gases.

Se aprecia un ahorro muy destacado de energía (Tab.5) y una disminución reseñable no sólo de las emisiones de gases sino también del polvo generado en la planta. Teniendo en cuenta el consumo total de energía consumido en la fabricación de una mezcla, incluido los materiales y el transporte, la bajada de temperatura en esta técnica representa un tercio del consumo total y el resto corresponde al betún, a los áridos y al consumo eléctrico de la planta. (Bardesi, et al.):

- La puesta de mezclas bituminosas con betunes y aditivos a temperaturas inferiores a las convencionales resulta más fácil que las convencionales al poderse trabajar a temperaturas más bajas.
- Se han logrado bajar hasta 30°C - 40°C la temperatura de aplicación.
- Con la Zeolita el consumo energético cae en un 20 % - 25 %.
- El ahorro en combustible puede llegar hasta un 25% - 30 %.
- La reducción radical de humos y partículas en suspensión es otra de las características de estas mezclas,
- Con algunas de estas mezclas se consigue aumentar el rango útil de trabajabilidad hasta los 70°C.
- La reducción de emisiones puede llegar al 40 %.

2.2.3. Material Reciclado (RAP)

El RAP es un producto derivado de la mezcla asfáltica tras su retirada y supone la principal fuente de material reciclado en pavimentaciones. Las máquinas de fresado rompen el material que conforma la pavimentación y la convierte en pequeñas fracciones (Fig.17) para producir RAP. De acuerdo con los expertos (Collins y Ciesielski, 1994), más de 100 millones de toneladas de RAP son producidos en los Estados Unidos cada año.



Fig. 17 Material retirado para la producción de RAP.

El producto fraccionado de RAP (FRAP) se produce para conseguir un control extra sobre el tamaño de partículas de RAP, el contenido de mastic, finos, y mejorar la calidad del producto final para la puesta en obra.

El uso de RAP en la construcción de mezclas bituminosas supone el perfecto compromiso entre coste sostenido y buena respuesta del producto. Algunos investigadores han demostrado que añadiendo RAP a las mezclas se logra una significativa reducción del impacto medioambiental en términos globales podemos hablar de porcentajes del orden del 23% en la fase de producción. Más aun, el RAP presenta una reducción del coste de producción. El árido virgen de altas prestaciones se muestra cada vez más difícil de obtener y explotar. En consecuencia, el RAP puede mejorar los costes y permite a las administraciones rehabilitar y construir más carreteras con la misma capacidad de Budget.

La adicción de RAP a las mezclas asfálticas está limitada en normativa española al 10% en capas Base e Intermedias, y es del 0% en capas de rodadura. Las agencias estatales norteamericanas como *The Illinois Department of Transportation* permiten hasta el 30% RAP en capas intermedias y capa de rodadura dependiendo del nivel de tráfico que presente la vía. Como se ha mencionado anteriormente el RAP ha sido siempre considerado un material resistente a la acción de envejecimiento en el transcurrir de su vida útil. El aumento de la rigidez en el RAP podrá conducir a diversas formas de fractura que disuaden a los productores de aumentar aún más el porcentaje de contenido en RAP.

Las mezclas bituminosas semiclientes con RAP presentan sus propios beneficios y disminuciones del coste. Estas mezclas presentan la habilidad de reducir los costes de producción y los impactos ambientales a través de un menor consumo de combustible y una reducción de las emisiones en tal fase.

Además, ciertos tipos de aditivos para la fabricación de mezclas semiclientes presentan la característica de mejorar la respuesta a las deformaciones permanentes, la fractura y la sensibilidad a la humedad. Sin embargo, las reducciones producidas por estas nuevas tecnologías sobre las temperaturas tienen un efecto negativo sobre la durabilidad de los

materiales. El uso de RAP puede también reducir los costes y ser respetuoso con el medio ambiente a través de la reutilización de materia reciclado. Aunque también goza de su propia problemática, el aumento de la rigidez en las mezclas asfálticas con un porcentaje de RAP comparadas con las mezclas tradicionales en caliente y las semicalientes puede mermar las características funcionales cuando se sobrepasa el límite porcentual de material reciclado.

Como se dijo anteriormente, la combinación de mezclas semicalientes y moderadas a altos porcentajes de RAP no se ha estudiado con gran detalle. El acoplamiento de mezclas semicalientes y RAP puede producir un rendimiento de calidad desde un punto de vista hipotético. Sin embargo, la interacción entre estos dos enfoques sostenibles es bastante complicada debido a los efectos de la interacción aglomerante virgen y RAP y las influencias de los diferentes tipos de tecnologías mezclas semicalientes. Por lo tanto, las evaluaciones como las que utilizan las pruebas de funcionamiento de los laboratorios son críticamente necesarios para evaluar mezclas semicalientes contienen RAP.

El RAP es una alternativa a los áridos vírgenes, económica y ambientalmente respetuosa. Este producto reciclado se crea mediante el uso de una fresadora similar a la mostrada en la Figura 18. Las máquinas fresadoras muelen el asfalto envejecido y llevado a rotura en partículas de tamaño agregado vírgenes mediante el uso de sistema de cuchillas que cortan continuamente el material. El RAP se descarga en un remolque a través de una cinta transportadora en la máquina de molienda (Fig.19). Una vez que el remolque está vacío, el material es llevado de vuelta a una planta de asfalto.



Fig. 18 Fresado y carga en bañera.

El RAP presenta varias ventajas a la comunidad de pavimento de asfalto. En primer lugar, señaló que anteriormente este material es generalmente rentable y respetuosa con el medio ambiente. Según Kandhal y Mallick (1997), el uso de un 20-50% de este material reciclado puede ahorrar hasta un 34% del costo total. Esta reducción en el costo está asociado con una reducción en el uso de ligante, el costo de material virgen, y el transporte de material virgen.



Fig. 19 Acopio de RAP fraccionado.

El RAP provoca un reducido impacto ambiental. Como se ha mencionado anteriormente, Chiu et al. (2008) encontraron una reducción del 23% en eco-carga debido a la cantidad reducida de ligante de asfalto requerida y la cantidad de energía requerida para calentar los materiales. RAP suministra generalmente una cantidad significativa de ligante de asfalto que pueden interactuar y recubrir el material agregado virgen. Comportamiento del pavimento tiene el potencial de ser mejorado por el uso de RAP. La rigidez relativa del material RAP puede mejorar el rendimiento en el área de deformación permanente

Como desventajas, es un material inherentemente rígido debido al efecto oxidante de la luz solar y la atmósfera. La presencia de tan poco como 15% RAP tiene la capacidad de endurecer significativamente una mezcla asfáltica. La resistencia a la fractura de las mezclas de asfalto se reduce mediante el uso de un mayor grado de asfalto. En consecuencia, la adición de RAP aumenta la rigidez, aumenta la naturaleza frágil de la mezcla de asfalto y la probabilidad de rotura frágil a bajas temperaturas. La variabilidad entre los distintos RAP es también un problema importante. El módulo complejo (G^*) de varios RAP han sido calculados y difiere significativamente. Por lo tanto, las reservas de RAP deben ser considerados en una base a cada caso.

2.2.3.1. Black Rock frente a Total Blending

Una consideración importante en el diseño de la mezcla, tanto para mezclas bituminosas en caliente como para mezclas bituminosas semicálidas, es la interacción del RAP y el ligante virgen. Diseños de mezcla de RAP requieren supuestos en cuanto al porcentaje de interacción del ligante, pero no ha habido ninguna respuesta definitiva a esta pregunta. El concepto Black Rock asume que el ligante RAP no interactúa en absoluto con el ligante virgen. Como resultado, la mezcla de asfalto se comporta de manera similar a la de una mezcla completamente virgen y la cantidad total de ligante virgen debe ser añadido para alcanzar el contenido de ligante elegido. Por otra parte, el concepto Total Blending asume que el ligante del RAP interactúa completamente con el ligante de asfalto virgen.

En consecuencia, la mezcla de asfalto se comporta como un híbrido entre una mezcla

completamente virgen y completamente reciclado. Además, un porcentaje del ligante virgen puede ser restado del contenido total debido a que los ligantes interactúan 100%. NCHRP Informe 9-12 determinó que los bajos porcentajes de RAP, como el 15% se comportan de manera similar sea para Black Rock que para Total Blending. Sin embargo, al 40% RAP, los investigadores comprobaron como la mezcla se comporta significativamente diferente.

Como resultado, un cierto porcentaje del ligante RAP debe interactuar mientras que el otro no. Como se ha indicado anteriormente, la interacción entre ligantes es significativa con el uso de tecnologías semicalientes. Generalmente menos rígida debido al efecto de envejecimiento menor como consecuencia de la reducción de temperatura.

A medida que los porcentajes de RAP se incrementan, hay que suponer que un porcentaje interactúa entre ligantes. Si el ligante RAP no interactúa, la resistencia a deformaciones permanentes se convierte en un problema importante y puede requerir ligante asfáltico modificado para reducir los problemas de deformación permanente.

2.2.3.2. Mezclas Semicalientes y RAP, Investigación

Dos trabajos importantes han sido: Mallick et al. (2008) y Middleton y Forfyflow (2009). Mallick et al. Examinando los efectos del uso de Sasobit, a niveles altos de RAP.

Las temperaturas de mezclado fueron 125°C y 150°C y al 75% de RAP. Los resultados produjeron varias conclusiones importantes. En primer lugar, el aditivo tuvo un efecto de refuerzo significativo sobre la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas de asfalto. Este resultado ha confirmado la hipótesis de que los aditivos de cera tienen una tendencia a endurecer las mezclas bituminosas a bajas temperaturas. A continuación, la presencia de 75% RAP no compensó el efecto de la adición de un ligante virgen más suave en términos de resistencia a la tracción indirecta. La adición del aditivo al ligante alto no mejoró la resistencia a la formación de roderas de la mezcla de mezclas semicalientes.

Middleton y Forfyflow (2009) realizaron para Mezclas Bituminosas Semicalientes y RAP una investigación utilizando un proceso de espumado. El ligante que mostraba un índice de penetración de 80/100 que se mantuvo constante durante toda la prueba con independencia del contenido de material reciclado. Los investigadores produjeron espumada virgen, 15% RAP espuma, y al 50% RAP y los probó.

Los resultados no determinaron problemas de resistencia a la formación de roderas significativas en ninguna de las mezclas. Como resultado, la más suave no aumentó la deformación permanente y la presencia de RAP no rigidizó significativamente las mezclas. Los resultados de las pruebas de sensibilidad a la humedad proporcionaron varias conclusiones. Middleton y Forfyflow determinaron que la sensibilidad es inversamente proporcional al porcentaje de RAP.

Por todo ello, la presencia de RAP puede endurecer el material y conducir a una mejor resistencia a la humedad. Por lo tanto, el RAP puede ser una parte integral de las mezclas con el fin de satisfacer los requisitos de sensibilidad a la humedad.

2.3. PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

2.3.1. Equipamiento para la ejecución de las obras

Se estará, en todo caso, a lo dispuesto en la legislación vigente en materia ambiental, de seguridad y salud y de transporte en lo referente a los equipos empleados en la ejecución de las obras.

2.3.1.1. Central de fabricación

Una planta de asfalto es un conjunto de equipos mecánicos y electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con asfalto para producir una mezcla asfáltica en caliente que debe cumplir con ciertas especificaciones. Una planta de asfalto puede ser pequeña o puede ser grande. Puede ser fija (situada en un lugar permanente) o puede ser portátil (transportada de una obra a otra). En términos generales cada planta puede ser clasificada como planta de dosificación, o como planta mezcladora de tambor.

El propósito es el mismo sin importar el tipo de planta. El propósito es producir una mezcla en caliente que posea las proporciones deseadas de asfalto y agregado, y que cumpla con todas las especificaciones. Ambos tipos de planta (plantas de dosificación y plantas mezcladoras de tambor) están diseñadas para lograr este propósito. La diferencia entre los dos tipos de planta es que las plantas de dosificación secan y calientan el agregado y después, en un mezclador separado, lo combinan con el asfalto en dosis individuales; mientras que las plantas mezcladoras de tambor secan el agregado y lo combinan con el asfalto en un proceso continuo y en la misma sección del equipo.

En la figura 20, 21 y 22 se muestran el diagrama de flujo de producción de mezcla en caliente en una planta de dosificación y equipos reales. A continuación se detalla todo este proceso:

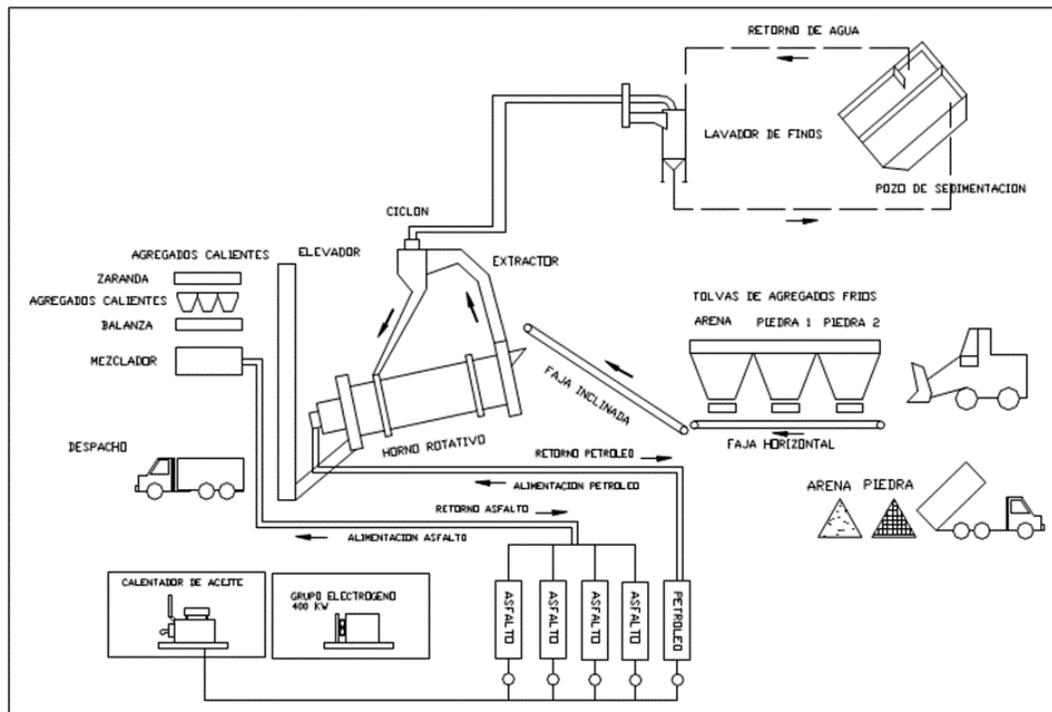


Fig. 20 Diagrama de flujo planta de dosificación de mezcla asfáltica en caliente.

2.3.1.1.1. Zarandas y Balanza

Los agregados calientes pasan del elevador a las zarandas metálicas de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{1}{4}$ " las cuales son activadas de modo que se desplazan horizontalmente y vibran, pasando así los agregados a llenar las tolvas correspondientes.



Fig. 21 Instrumento de mezclado
(Fuente: www.asphaltplants.com.ec).



Fig. 22 Planta asfáltica (Fuente: www.ttm-asphaltplant.es).

2.3.1.2. Elementos de transporte

Consistirán en camiones de caja lisa y estanca, perfectamente limpia, y que se tratará, para evitar que la mezcla bituminosa se adhiera a ella, con un producto cuya composición y dotación deberán ser aprobadas por el Director de las Obras.

La forma y altura de la caja deberá ser tal que, durante el vertido en la extendedora, el camión sólo toque a éste a través de los rodillos provistos al efecto.

Los camiones deberán estar siempre provistos de una lona o cobertor adecuado para proteger la mezcla bituminosa durante su transporte.

2.3.1.3. Equipo de extendido

Las extendedoras serán autopropulsadas y estarán dotadas de los dispositivos necesarios para extender la mezcla bituminosa en caliente con la configuración deseada y un mínimo de precompactación, que deberá ser fijado por el Director de las Obras. La capacidad de sus elementos, así como su potencia, serán adecuadas al trabajo a realizar.

La extendedora deberá estar dotada de un dispositivo automático de nivelación y de un elemento calefactor para la ejecución de la junta longitudinal.

Para la extensión de mezclas bituminosas, en obras de carreteras con intensidades medias

diarias superiores a diez mil (10 000) vehículos/día o cuando la extensión de la aplicación sea superior a setenta mil metros cuadrados (70 000 m²), en las categorías de tráfico pesado T00 a T2, las extendedoras irán provistas de un sistema de riego de adherencia incorporado al mismo que garantice una dotación, continua y uniforme.

Se comprobará, en su caso, que los ajustes del enrasador y de la maestra se atienen a las tolerancias mecánicas especificadas por el fabricante, y que dichos ajustes no han sido afectados por el desgaste u otras causas.

Para las categorías de tráfico pesado T00 a T31 o con superficies a extender en calzada superiores a setenta mil metros cuadrados (70 000 m²), será preceptivo disponer, delante de la extendidora, de un equipo de transferencia autopropulsado de tipo silo móvil, que esencialmente garantice la homogeneización granulométrica y además permita la uniformidad térmica y de las características superficiales.

La anchura extendida y compactada será siempre igual o superior a la teórica, y comprenderá las anchuras teóricas de la calzada o arceños más los sobreeanchos mínimos fijados en los Planos. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará las anchuras máxima y mínima de la extensión y la situación de las juntas longitudinales necesarias. Si a la extendidora se pueden acoplar elementos para aumentar su anchura, éstos deberán quedar perfectamente alineados con los de aquella y conseguir una mezcla continua y uniforme.

2.3.1.4. Equipo de compactación

Según el artículo 542.4.4 del PG-3, se podrán utilizar compactadores de rodillos metálicos, estáticos o vibrantes, de neumáticos o mixtos. La composición mínima del equipo será un (1) compactador vibratorio de rodillos metálicos o mixtos, y un (1) compactador de neumáticos; para mezclas bituminosas drenantes este último se sustituirá por un (1) compactador de rodillos metálicos tándem, no vibratorio.

Todos los tipos de compactadores deberán ser autopropulsados, tener inversores de sentido de marcha de acción suave, y estar dotados de dispositivos para la limpieza de sus llantas o neumáticos durante la compactación y para mantenerlos húmedos en caso necesario.

Los compactadores de llantas metálicas no presentarán surcos ni irregularidades en ellas. Los compactadores vibratorios tendrán dispositivos automáticos para eliminar la vibración, al invertir el sentido de su marcha. Los de neumáticos tendrán ruedas lisas, en número, tamaño y configuración tales que permitan el solape de las huellas de las delanteras y traseras, y faldones de lona protectores contra el enfriamiento de los neumáticos.

Las presiones de contacto, estáticas o dinámicas, de los diversos tipos de compactadores serán aprobadas por el Director de las Obras, y serán las necesarias para conseguir una compacidad adecuada y homogénea de la mezcla en todo su espesor, sin producir roturas del árido, ni arrollamientos de la mezcla a la temperatura de compactación.

En los lugares inaccesibles para los equipos de compactación normales, se emplearán otros de tamaño y diseño adecuados para la labor que se pretende realizar y siempre deberán ser autorizados por el Director de las Obras.

2.3.1.5. Equipo de fresado

El fresado es una técnica que consiste en la eliminación parcial del firme existente para una posterior reposición del mismo. En el fresado, se retiran aquellas capas que están agotadas o cercanas a agotarse, y se sustituyen por otros materiales adecuados a los agentes que provocan el deterioro en ese tramo. Es conveniente que los materiales repuestos sean similares a los existentes anteriormente y en los tramos contiguos, para procurar una continuidad de las características del firme.

El espesor total del fresado y reposición depende del tipo de firme que se trate, del deterioro del mismo caracterizado gracias a su deflexión de cálculo y del tipo de tráfico. En la Norma 6.3. IC de Rehabilitación de firmes se marca el espesor total de mezcla bituminosa discriminando en firmes flexibles, semiflexibles o semirrígidos en los que se hayan eliminado total o parcialmente las capas rígidas, firmes semirrígidos de grava-cemento y firmes semirrígidos de suelo-cemento.

En la normativa se establece el umbral del valor puntual de la deflexión patrón para el agotamiento estructural del firme, según el tipo de firme y la categoría de tráfico pesado, para a continuación definir el espesor total de la mezcla bituminosa nueva.

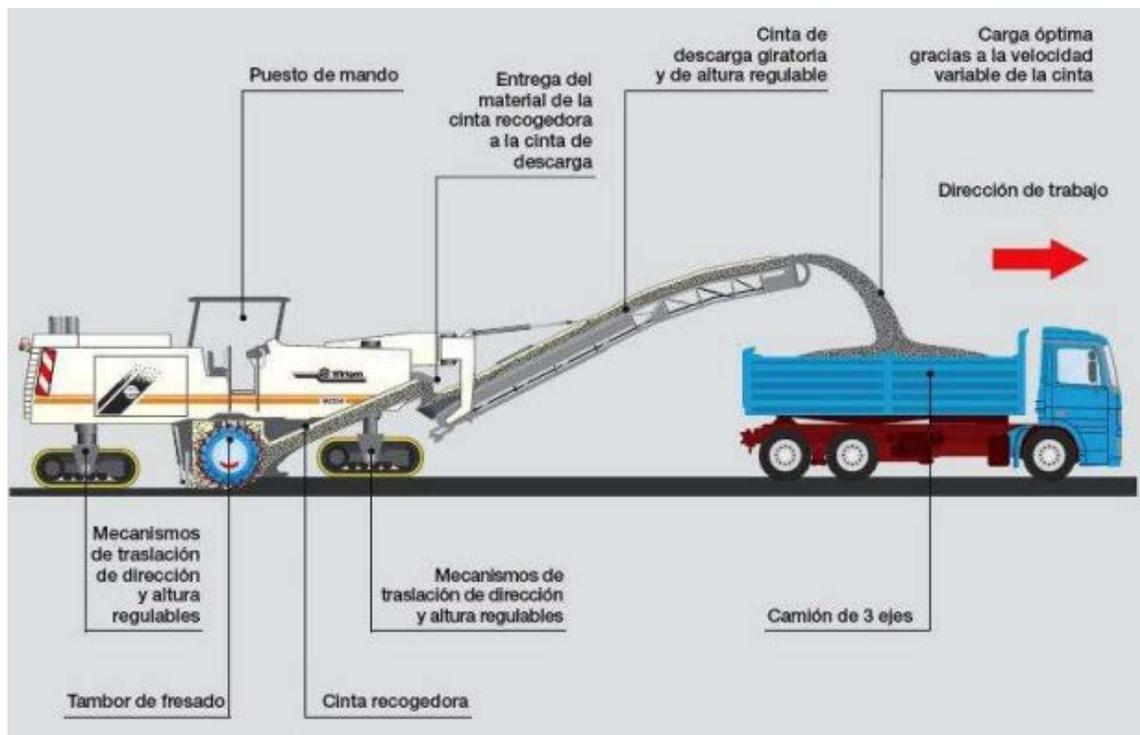


Fig. 23 Ejemplo de una máquina fresadora.

2.4. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Un rápido aumento de la conciencia relativa a la necesidad de protección medioambiental, y los posibles impactos vinculados a los productos, tanto manufacturados como consumidos, han dado lugar al desarrollo de metodologías para analizar y tratar dichos impactos. Una de las técnicas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV).

El ACV se muestra de ayuda en:

- la identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las diferentes etapas de su vida;
- la aportación de información en la toma de decisiones (por ejemplo, para la planificación estratégica o el establecimiento de prioridades);
- la selección de indicadores de desempeño ambiental, incluyendo técnicas de medición;
- y el marketing (como, elaborando un etiquetado ambiental, o una declaración ambiental del producto).

El ACV trata aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo de su entero ciclo de vida desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (de la cuna a la tumba). Existe otro tipo de ACV, cuya principal diferencia con el anterior es que alarga el ciclo de vida, de la cuna a la cuna (Fig.24).



Fig. 24 Esquema del Ciclo de Vida (Fuente. www.epa.gov)

Existen cuatro fases en un estudio ACV, la definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario, la evaluación del impacto ambiental y la fase de interpretación.

El alcance, depende del tema y del uso previsto. Puede variar en función del objetivo de un ACV en particular.

El análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) es la segunda fase del ACV. Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Supone recopilar los datos

con el fin de alcanzar los objetivos que se pretenden en el estudio definido.

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) tiene como objetivo proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) a fin de comprender mejor su importancia ambiental.

La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV o del EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con los objetivos y el alcance definidos.

Por supuesto, existen casos en los cuales el objetivo del ACV se satisface desarrollando un análisis de inventario y una interpretación. Es habitual hacer referencia a esto como un estudio de ICV.

En general la información desarrollada en un ACV se puede utilizar como parte de un proceso de decisión mucho más amplia.

El ACV es una de las diversas técnicas de gestión ambiental existentes y podría no ser la técnica más apropiada para usar en todas las situaciones. En general el ACV no considera aspectos económicos o sociales de un producto.

2.4.1. Contexto histórico

La vertiginosa revolución tecnológica que nuestra sociedad ha experimentado durante las últimas décadas, aún más fuerte a día de hoy, ha traído consigo cambios drásticos que han acarreado serios problemas en materia medioambiental. Esto ha dado pie a una corriente de pensamiento mucho más concienciada en términos ambientales, comenzando por acabar con la creencia de que los recursos naturales son infinitos y la definición del desarrollo sostenible.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, desarrollada en Estocolmo (1972) se alcanzó un acuerdo por la necesidad de instaurar un criterio y una serie de principios comunes con el objetivo de lograr paliar el efecto de las acciones antrópicas que producen daño al medio ambiente. Veinte años más tarde, en 1992, tuvo lugar en la ciudad brasileña de Río de Janeiro la Conferencia de las Naciones Unidas del Medio Ambiente y Desarrollo, popularmente conocida como “Cumbre para la Tierra”. En dicha cumbre los países participantes lograron un acuerdo donde se pretendía adoptar un enfoque de desarrollo que fuera protector del medio ambiente y asegurase el desarrollo económico y social, más conocido como desarrollo sostenible donde no se comprometa a las generaciones futuras.

Esto supone un punto de inflexión. A partir de la Cumbre de la Tierra empezaron a desarrollarse multitud de políticas medioambientales, entre las que cabe destacar la Directiva 16/2002/CE conocida como IPPC, Prevención y Control Integrado de la Contaminación (Integrated Prevention of Pollution Control), cuyo fin es proteger el medio ambiente en su conjunto mediante la minimización de las emisiones contaminantes a la atmósfera, las aguas y los suelos, así como los residuos procedentes de instalaciones industriales y agrarias para alcanzar un elevado grado de protección del medio ambiente. El ACV es una herramienta medioambiental en crecimiento que se usa con el fin de predecir y comparar los impactos ambientales de un producto o servicio, “de la cuna a la tumba” (White, P. R., et al., 1995). Eso quiere decir que el estudio incluye, además de la fabricación del producto de sus materias primas, su uso y mantenimiento y la gestión del

residuo una vez ha acabado su vida útil (Clemente, G., et al., 2005).

Para hablar del primer ACV hace falta remontarse al año 1969, fue un estudio encargado por la compañía Coca-Cola al Midwest Research Institute (MRI), su principal objetivo era disminuir el consumo de recursos y, con ello, conseguir una menor cantidad de emisiones al ambiente.

La primera definición consensuada del ACV y más utilizada hasta el momento se debe a la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry). Así se define que “el ACV es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción y procesado de materias primas; producción, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento, y reciclado y disposición del residuo” (Fullana, P., et al., 1997).

Así mismo la SETAC fue el primer organismo que unificó los criterios metodológicos para la realización de estudios de ACV en el llamado “Código de prácticas para el ACV”. Con la creación de este código, el ACV experimentó un aumento mundial en su aplicación que incentivó a que la Organización Internacional de Normalización (ISO, International Organization for Standardization) creara cuatro normas, recogidas en ISO 14040:1997, para la creación del marco de trabajo, de metodologías, procedimientos y terminología. Dichas normas, años después se agruparon en dos nuevas normas: 14040:2006 y 14044:2006, en las cuales se designa el ACV como “una recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida” (Chacón, J.R., 2008).

2.4.2. Metodología y Normativa

2.4.2.1. Principios

Cabe mencionar al inicio los principios fundamentales del ACV y que se deberían utilizar como orientación para tomar decisiones relacionadas tanto con la planificación como con la realización.

El ACV considera el ciclo completo de un producto, desde la extracción y adquisición de la materia prima, pasando por la producción de energía y materia, hasta el uso y el tratamiento al final de la vida útil y la disposición final. A través de esta visión general y perspectiva sistemática, se puede identificar y posiblemente evitar el desplazamiento de una carga ambiental potencial entre las etapas del ciclo de vida o los procesos individuales.

Enfoque puramente ambiental, el ACV trata los aspectos e impactos ambientales de un sistema del producto. Los aspectos e impactos económicos y sociales, generalmente están fuera del alcance del ACV. Se pueden combinar otras herramientas con el ACV para análisis más profundos.

El ACV es un enfoque relativo, que se estructura alrededor de una unidad funcional. Esta unidad funcional define lo que se está estudiando. Todos los análisis subsecuentes son por tanto relativos a esa unidad funcional, ya que todas las entradas y salida en el ICV, y

consecuentemente el perfil de la EICV, se relacionan con la unidad funcional.

Además, el ACV es una técnica iterativa. Las fases individuales de un ACV utilizan resultados de las otras fases. El enfoque iterativo en y entre las fases contribuye a la integridad y coherencia de estudio y de los resultados presentados.

Debido a la complejidad inherente al ACV, la transparencia es un principio guía importante en la realización de los ACV, a fin de asegurar una adecuada interpretación.

El ACV considera todos los atributos o aspectos del entorno natural, de la salud humana y de los recursos. Al considerar en un solo estudio y con una perspectiva transversal todos los atributos y aspectos, se pueden identificar y evaluar las compensaciones potenciales.

Existe una prioridad de enfoque científico, las decisiones se basan preferentemente en las ciencias naturales. Si esto no es posible, se pueden utilizar otros enfoques científicos o hacer referencia a convenciones internacionales. Si no existe una base científica ni una justificación basada en otros enfoques científicos o en convenciones internacionales, las decisiones se pueden basar en juicios de valor.

2.4.2.2. Fases

La metodología del ACV considera una serie de fases de trabajo interrelacionadas que sigue una secuencia definida. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconstruirla a la luz de los nuevos datos adquiridos. El ACV es, por tanto, un proceso de retroalimentación y enriquecimiento progresivo directamente proporcional al avance del mismo. Tal y como se muestra en la Figura 00 el ACV consta de 4 etapas:

1. Definición del objetivo y el alcance,
2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV),
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV),
4. Interpretación del ciclo de vida.

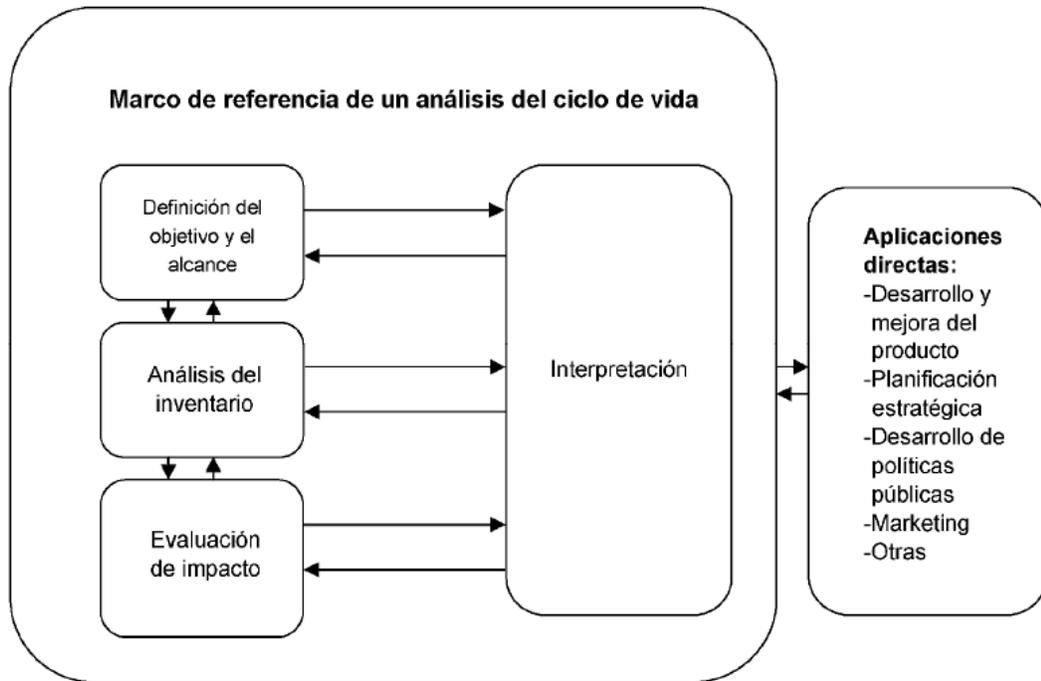


Fig. 25 Fases de un Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040, 2006).

2.4.2.2.1. Definición del objetivo y el alcance

El objetivo de un ACV debe especificar la aplicación prevista, las razones por las cuales se ha realizado el estudio, las personas a quienes se prevé comunicar los resultados del estudio y si se pretende utilizar los resultados en aseveraciones comparativas para su divulgación al público (ISO 14044, 2006).

El alcance debería estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo del estudio (ISO 14040, 2006).

2.4.2.2.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

El análisis de inventario implica la recopilación de los datos con el fin de cuantificar las entradas y salidas de materia y energía del sistema estudiado (Clemente et al., 2005).

Posterior a la recopilación de datos se procede a la validación de los datos recopilados y a la relación de los datos con los procesos unitarios y con el flujo de referencia de la unidad funcional.

Por último, si fuera necesario, se realiza la asignación de flujos, emisiones y vertidos debido a que pocos procesos industriales producen una salida única o están basados en una relación lineal entre las entradas y las salidas de materias primas (ISO 14040, 2006).

2.4.2.2.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

La evaluación de impacto dentro de un ACV tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del Inventario del Ciclo de Vida

(ICV). En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de estas categorías para entender esos impactos (ISO 14044, 2006). Este proceso se desarrolla normalmente en cuatro pasos, aunque los dos últimos son optativos (Clemente et al, 2005; Fullana et al., 1997):

- I. **Clasificación:** las cargas ambientales del sistema se asignan a las distintas categorías de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado.
- II. **Caracterización:** se evalúa el efecto total del sistema de producto sobre cada una de las categorías de impacto ambiental.
- III. **Normalización:** los resultados de la caracterización se contrastan respecto a un valor de referencia para ver su relevancia.
- IV. **Valoración:** se evalúa cualitativa o cuantitativamente la importancia relativa de las distintas categorías de impacto.

La cuestión a resolver en la evaluación de impactos es que los resultados del inventario no se pueden interpretar. Por ello se estudia la contribución del conjunto de todas estas sustancias a una serie de impactos ambientales más o menos conocidos.

2.4.2.2.4. Normalización

La normalización se define como “el cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría con respecto a cierta información de referencia” (ISO 14044,2006). Se trata de un paso opcional dentro del Análisis de Ciclo de Vida, más concretamente dentro de la fase de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, que puede ser utilizada como ayuda en la interpretación de los datos del Inventario (Soto, 2009).

La normalización consiste en la comparación del valor del indicador de impacto obtenido con un valor de referencia para cada categoría de impacto. El cálculo básico para llevar a cabo una normalización viene dado por la Ecuación 1 (Bare, et al. 2006).

$$N_i = \frac{S_i}{A_i} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

i: categoría de impacto.

N: resultado normalizado.

S: resultado del sistema de producto antes de la normalización.

A: valor de referencia para la normalización.

2.4.2.2.5. Interpretación del ciclo de vida

En la interpretación se combina la información obtenida en el inventario y la evaluación de impacto interpretando los resultados de acuerdo con los objetivos del estudio, para sacar una serie de conclusiones y/o recomendaciones (Clemente, et al., 2005).

La interpretación del ciclo de vida intenta ofrecer una lectura comprensible, completa y coherente de la presentación de resultados de un ACV, de acuerdo con la definición del objetivo y alcance del estudio.

2.4.3. Aplicaciones y beneficios

El ACV es generalmente aceptado como una aplicación del sistema de análisis cuyo principal objetivo es proporcionar una imagen de las interacciones de una actividad con el medioambiente. Como tal, el ACV tiene dos objetivos principales: cuantificar y evaluar las funciones medioambientales de un producto o proceso y, de esta manera, ayudar a la entidad decisoria a elegir entre las diferentes alternativas. Otro de los objetivos es proporcionar una base para valorar la capacidad de mejora del rendimiento del sistema en el medio ambiente. Este último objetivo es de particular importancia para ingenieros y técnicos medioambientales, ya que pueden sugerir diferentes caminos para modificar y diseñar el sistema con el fin de disminuir en su conjunto los impactos ambientales. Algunos ejemplos de las aplicaciones del ACV en la toma de decisiones incluyen los sectores de energía y transporte, como también la industria química, nuclear, textil entre otras (Azapagic, 1999). Estas aplicaciones tienen principalmente los siguientes usos:

- Planificación estratégica o desarrollo estratégico medioambiental.
- Optimización de productos o procesos, diseño e innovación.
- Identificación de las oportunidades de mejora ambiental.
- Informe medioambiental y marketing.
- Creación de un nuevo marco de trabajo para las auditorías ambientales.

Algunos de los usos del ACV en la industria se muestran en la Figura 26.

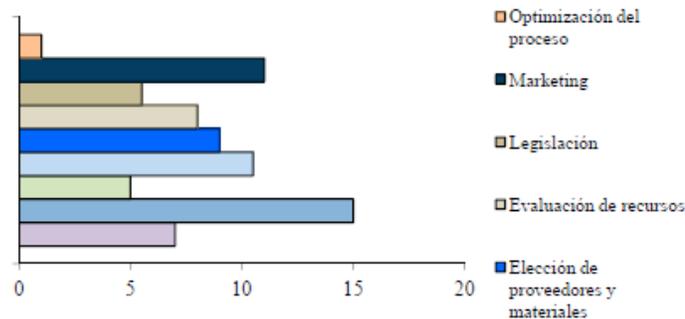


Fig. 26 Usos del ACV en la industria.

Estos datos están basados en una encuesta internacional sobre el número de organizaciones que se encuentran activamente involucradas en la realización de un ACV. Los datos indican que las principales razones que llevan a realizar un ACV son mejorar medioambientalmente el rendimiento a través del análisis de los productos e informar a corto y largo plazo de las decisiones políticas a través de sistemas de diseño y optimización. Otra encuesta identifica que las principales barreras del uso del ACV en la industria, son el relativo alto coste y el tiempo necesario que se requiere para llevar a cabo un ACV, unido con la incertidumbre de los potenciales beneficios comerciales (Azapagic, 1999).

3. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

3.1. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía debido al transporte es considerable, en torno al 30% del uso total de energía en Europa. El transporte por carretera es responsable de una gran parte, más del 80%, y ya que la que se utiliza es principalmente de combustibles fósiles, la emisión de gases de efecto invernadero es sustancial. A esto se suma la energía utilizada para la construcción, puesta en obra y mantenimiento de la infraestructura, como carreteras, ferrocarriles, etc. La infraestructura de las carreteras es también un factor importante, ya que no es sólo el impacto y uso de los recursos del medio ambiente generados en la construcción y el mantenimiento, sino porque también existe un efecto sobre el consumo de combustible de los vehículos debido a la alineación carretera y resistencia a la rodadura.

A continuación se enumeran una serie de estudios científicos que utilizan la metodología de ACV para estudiar las mezclas asfálticas y las carreteras. La elección de limitarnos a los estudios europeos deriva del hecho de que pueden ser considerados los más relevantes y que han sido realizados desde mediados de la década de 1990.

Una de las conclusiones de la compilación es que los resultados de estos estudios no son directamente comparables, ya que los requisitos previos subyacentes difieren. Por ejemplo, se incluyen las diferentes etapas del ciclo de vida y los diferentes aspectos de los impactos ambientales. Otras diferencias son el diseño de la construcción de carreteras y el número de años para los que se estima que el impacto ambiental. Otra diferencia importante es el enfoque de los estudios. Por ejemplo, algunos hacen comparaciones de asfaltos, mientras que otros comparan las alternativas ya sea para depositar los materiales de desecho, por ejemplo, la escoria, o para utilizarlos en la construcción de carreteras.

Un resultado común es la conclusión de que todas las carreteras son únicas y tienen sus propias condiciones específicas, lo que significa que se necesita un método flexible que se puede ajustar a la carretera que desea estudiar. Además, los estudios que han estimado el consumo de energía debido al tráfico han llegado a la conclusión de que la energía utilizada para la construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura sólo represente una pequeña parte del consumo de energía para el tráfico.

3.2. ESTUDIOS DE ACV DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN EUROPA

El uso de la energía debido al transporte es considerable, en torno al 30% del consumo final de energía en Europa (Comisión Europea, 2010). Las carreteras son responsables de una gran parte, más del 80%, y ya el tráfico es todo de combustibles fósiles, y por ello la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es sustancial. Por otra parte, cuando la mayoría de los sectores de la economía tienen una tendencia a la baja o de estabilización se produce una tendencia creciente en el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte (Comisión Europea, 2010). Por lo tanto, el transporte es un sector en el que las medidas deben adoptarse para reducir la demanda de energía y el impacto ambiental. Hasta ahora, una gran cantidad de atención se ha puesto en el desarrollo de combustibles renovables y motores más eficientes. Sin embargo, se ha hecho evidente que otros aspectos de la infraestructura vial, como la construcción y el mantenimiento, también utilizan una considerable cantidad de energía y que

no puede ser un gran ahorro de energía por la elección de la alineación de vial y características de la superficie de la carretera que puede reducir el uso de combustible de vehículos (ECRPD 2010).

Para describir el desempeño ambiental neto de una carretera, y sus distintas fases, se puede utilizar la metodología de evaluación del ciclo de vida (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Algunos estudios europeos que utilizan este enfoque se han realizado desde mediados de los noventa. A continuación se recogen algunos de los estudios científicos más interesantes realizados en Europa. Sólo artículos e informes publicados en inglés han sido incluidos, sin embargo, hay estudios publicados en otros idiomas que podrían ser de interés. La Tabla 1 enumera los estudios que se describen y las etapas del ciclo de vida que consideren. El final de la vida útil de una carretera no está incluido en la tabla desde un camino, una vez que se construye, se puede considerar que no tiene un fin de vida. La Tabla 2 describe los aspectos ambientales medidas en el estudio respectivo y en la Tabla 3 se presenta un resumen de período de análisis, la unidad funcional y la anchura de la sección de carretera estudiado.

Referencia	Etapas de los ACV			
	Construcción		Mantenimiento	Tráfico
	Tierra	Asfalto		
Häkkinen & Mäkele (1996)		X	X	X
Mroueh et al. (2001)	X	X	X	X
Stripple (2001)	X	X	X	X
Chappat & Bilal (2003)		X	X	X
Hoang et al. (2005)		X	X	
Olsson et al. (2006)	X			
Birgisdottir et al. (2007)	X	X		
Huang et al. (2009)		X		
Sayagh et al. (2010)		X	X	
ECRPD (2010)		X	X	

Tabla 6 Etapas dentro de los estudios del ACV en Europa de carreteras.

Referencia	Consideraciones medioambientales								
	MJ	CO ₂	NO _x	SO _x	CO	VOC	PM	Other	Impact
Häkkinen & Mäkele (1996)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mroueh et al. (2001)	X	X	X	X	X	X	X	X	
Stripple (2001)	X	X	X	X					
Chappat & Bilal (2003)	X	X						X	
Hoang et al. (2005)	X	X						X	
Olsson et al. (2006)	X	X	X	X	X	X	X	X	
Birgisdottir et al. (2007)	X	X						X	X
Huang et al. (2009)	X	X	X		X	X		X	
Sayagh et al. (2010)	X	X	X	X		X	X	X	X
ECRPD (2010)	X	X	X	X	X		X	X	

Tabla 7 Aspectos ambientales considerados en los estudios de ACV europeas de carreteras.

Referencia	Período de análisis (años)	Unidad funcional	Ancho (m)
Häkkinen & Mäkele (1996)	50	1 km de carretera	8,5
Mroueh et al. (2001)	50	1 km de vía	12
Stripple (2001)	40	1 km de vía	13
Chappat & Bilal (2003)	30	1 m2 carretera	1
Hoang et al. (2005)	30	1 km de autopista	10
Olsson et al. (2006)	-	1 km de vía	-
Birgisdottir et al. (2007)	100		17,25
Huang et al. (2009)	-	30 000 m2 de asfalto	-
Sayagh et al. (2010)	30	1 km asfalto	3,5
ECRPD (2010)	25	1 km asfalto	9,5; 11,5; 25,5; 27,5

Tabla 8 Período de análisis, la unidad y la anchura de la carretera para los estudios de evaluación del ciclo de vida de las carreteras europeas funcional.

En 1996, Häkkinen y Makele estudiaron el impacto medioambiental de los pavimentos de carreteras de hormigón y asfalto. La evaluación se basa en la vida útil esperada de la carretera y las cargas ambientales debidas a la producción, uso y disposición del material. Además, tiene en cuenta el uso de energía del tráfico, no hacen ninguna diferencia entre los vehículos o que diferentes texturas de la superficie. También el ruido, los requisitos de iluminación, la formación de polvo, la carbonatación hormigón y perturbaciones de tráfico durante el mantenimiento se considera mientras que la fase final de su vida útil no lo es. El periodo de análisis es de 50 años y la unidad funcional es de 1 kilómetro de pavimento en una autopista. Además del uso de la energía, los aspectos ambientales, entre otros, fueron las emisiones de CO₂, SO₂, NO_x y CO.

La principal contribución a la carga ambiental fue el contenido de betún, la fabricación y las operaciones de mantenimiento. Sin embargo, el impacto ambiental debido a los materiales de pavimento, pavimentación, mantenimiento e iluminación es relativamente bajo en comparación con el uso de la energía y el impacto ambiental causado por el tráfico.

Por su parte, Mroueh et al. (2001) estudiaron la construcción de carreteras y movimiento de tierras, con el objetivo de crear un programa de análisis de inventario que se pudiera utilizar para calcular y comparar los impactos del ciclo de vida de los diferentes métodos de construcción de carreteras y fundamentos de ingeniería más comunes. Se realizaron estudios del caso de la utilización de diferentes subproductos industriales, como cenizas de carbón, residuos de hormigón triturado y escoria granulada de alto horno, en la carretera y de la tierra construcciones. El análisis incluyó todas las etapas importantes identificados por los autores, que abarcan la producción y el transporte de los materiales, su colocación y el uso de la construcción.

Los resultados muestran que mediante el uso de subproductos tales como escorias de alto horno y hormigón triturado en lugar de agregados naturales se reducen los impactos ambientales. Las cargas más significativas fueron generadas por la producción y transporte de los materiales utilizados en la construcción de carreteras.

Stripple desarrolló y utilizó un método en la construcción, mantenimiento y operación de una

carretera que se divide en pequeñas unidades de proceso. Este enfoque resulta dinámico y hace posible variar las condiciones del proceso. El estudio comparó las fases del ciclo de vida de dos pavimentos de asfalto y un pavimento de hormigón. La principal consumidora de energía fue la carretera en fase de uso, donde el consumo de electricidad debido a la iluminación de las calles y semáforos son los principales consumidores de energía. Sin embargo, ya que la mayoría de la electricidad se produce con la energía nuclear y la hidroeléctrica esta etapa del ciclo de vida no tiene una participación significativa de las emisiones. En cuanto a las emisiones de CO₂, NO_x y SO₂, la construcción de la carretera es la fase de mayor contribución

El estudio de ACV realizado por Chapat y Bilal (2003) describe la contribución de 20 técnicas de construcción de carreteras diferentes con respecto al pavimento, en el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Diferentes clases de tráfico describen el número de vehículos ligeros y pesados por día que se asumió y se analizaron en cuanto al efecto sobre el consumo de energía. Una carga de tráfico más pesado requiere una mejor capacidad de soporte y también habrá una mayor necesidad de operaciones de mantenimiento. La intensidad de tráfico también tendrá un efecto en las emisiones de gases de efecto invernadero, en el que habrá más emisiones con una carga de tráfico más pesado.

Se muestra que hay una ventaja al utilizar betún en emulsión y de alto módulo debido a que estas técnicas permiten gestionar y optimizar el uso de energía y también reducir los gases de efecto invernadero.

Hoang et al. (2005) realizaron estudios de dos tramos carreteros diferentes en Francia, uno con mezcla asfáltica (AC) y el otro con hormigón armado (CRC). En el documento se presentan, sólo el uso de energía, emisiones de CO₂ y el uso de áridos naturales y el betún. Sin embargo, es posible calcular el uso de otro material y también las emisiones de otras sustancias. El resultado de la comparación muestra que, durante un período de 30 años la alternativa CRC utiliza más energía que la AC, aproximadamente un 40% más. CRC también conduce a más emisiones de CO₂, casi 3 veces más, que las AC. El uso de la energía para el trabajo de construcción y mantenimiento se estima en 7.780 GJ para CRC y 5.500 GJ para AC. Las emisiones de CO₂ de las dos alternativas se estimaron en 1.050 toneladas para CRC y 310 toneladas en la AC. Las diferencias se deben principalmente a la fase de construcción. Los dos principales contribuyentes son el consumo de energía y las emisiones de CO₂, y además para los CRC son la producción de cemento y acero para trabajo y en las AC el calentamiento en fase de producción y el transporte de los materiales de la mezcla.

Fue en 2006 cuando Olsson y su equipo realizaron un análisis de los sistemas ambientales (ESA). Se hizo sobre el uso de las cenizas de fondo procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) para la construcción de la capa de sub-base. ESA es un método para describir el impacto medioambiental desde un punto de vista holístico, y se basa en el marco de la evaluación del ciclo de vida. Dos casos fueron estudiados en el análisis, uno donde sólo se utilizaron áridos naturales y otro que se utilizó ceniza de fondo en el sub base de la carretera. La conclusión fue que el uso de material reutilizado o reciclado lleva a un menor uso de energía y de las emisiones derivadas de la energía.

Huang et al. (2009) hicieron un estudio de un proyecto de pavimentación de asfalto en Londres Heathrow Terminal-5. En el estudio los áridos naturales fueron sustituidos por residuos de vidrio, cenizas y pavimentos asfálticos reciclados. Los resultados del ciclo de vida de estas alternativas se compararon con un caso en el que sólo se utilizó material virgen para producir un pavimento

del mismo tamaño y función. De acuerdo con los resultados, la producción de mezcla asfáltica en caliente y betún eran los procesos intensivos de la mayoría de la energía y también fueron responsables de la mayor parte de las emisiones.

En su estudio, Sayagh et al. (2010), describieron los problemas que se plantean cuando se realiza una evaluación ambiental de diferentes estructuras de pavimento. En el análisis se utilizó una herramienta desarrollada por el "Laboratoire central des Ponts et Chaussées", denominado ERM (módulo vial primario), donde se aplica la metodología de evaluación del ciclo de vida a estructuras viales. Según los autores, el ERM permite comparar distintas técnicas y materiales de construcción. En este estudio se evaluaron tres diferentes estructuras de pavimento; dos con el material clásico, mezcla asfáltica y hormigón, y otra donde se utilizó la escoria de alto horno.

ECRPD es un proyecto de la UE que se finalizó en 2010 (ECRPD, 2010). El objetivo general fue evaluar la conservación de energía en la fabricación de pavimentaciones y su puesta en obra, es decir, aquellos materiales que requieren una menor energía y el mantenimiento de las carreteras existentes. En particular, ahorrando energía en el mantenimiento de carreteras. Este proyecto un estudio de ACV se realizó en 6 países y cuatro tramos diferentes; autopista, autovía, y dos tipos del resto de vías convencionales. Sólo las etapas de realización en mezcla asfáltica durante la construcción y el mantenimiento fueron incluidas, mientras que las fases iniciales, como la preparación del terreno y construcción de las capas inferiores, fueron excluidas. El punto de partida es la extracción de la materia prima. El ACV se centra en el uso de energía y las emisiones en la extracción y procesado de materias primas, la producción y el manejo de las mezclas asfálticas y de sus componentes. El objetivo principal del estudio ACV fue comparar el impacto ambiental de la construcción de carreteras de asfalto y mantenimiento durante su ciclo de vida.

El resultado muestra que es la producción de mezclas de asfalto y sus componentes las etapas de más consumo de energía, alrededor de 90% de toda la energía necesaria. Para las emisiones el resultado es el mismo donde casi todo es debido a la producción.

Re-Road es un proyecto de la Unión Europea cuyo objetivo es desarrollar conocimientos y tecnologías para mejorar las estrategias de final de la vida útil de las carreteras de asfalto. Principalmente mediante la evaluación de las estrategias para el reciclaje de asfalto. En el proyecto se utilizará la metodología del ACV para analizar los impactos ambientales de las diferentes estrategias de materiales para asfalto reciclado. El ciclo de vida incluye la construcción, el mantenimiento, el uso y retirada del asfalto. El flujo de referencia es una tonelada de asfalto.

El objetivo es mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto medioambiental del sistema de transporte europeo. Una parte de este proyecto es evaluar los criterios ambientales, como la evaluación de riesgos y beneficios para el medio ambiente con el uso de asfalto reciclado.

El estudio hará uso del análisis comparativo, la exploración de diferentes estrategias para la utilización de asfalto reciclado y para alcanzar el nivel requerido de precisión será necesario para generar unos datos de inventario del ciclo de vida específicos de asfalto reciclado. El informe sobre el estudio de ACV se hará público en el sitio web del proyecto.

3.3. ACV DE INTERÉS PARA LAS CARRETERAS

Algunos estudios del ciclo de vida se han concentrado en una parte bien definida de una carretera. Tal análisis parcial puede ser útil para evaluar las posibles mejoras en el comportamiento ambiental y para el desarrollo de los ciclos de vida más completos para productos específicos

como pavimentos, etc. Por ejemplo, Josa et al. (2004) hicieron un análisis comparativo de diferentes cemento producidos en Europa y Marinkovic et al. (2010) hizo una evaluación ambiental comparativa del hormigón con áridos naturales y reciclados.

En 2011 la organización Eurobitume publicó una versión actualizada de un inventario del ciclo de vida de producción de betún (Eurobitume 2011). El estudio abarca la extracción de petróleo crudo, el transporte (en barco y por tierra), los diferentes procesos de fabricación del betún y el almacenamiento en caliente. También se estudió la construcción de instalaciones de producción. El proceso en el que se utilizó la mayor cantidad de energía y donde se produjeron la mayor cantidad de emisiones de CO₂ fue la extracción de petróleo crudo, casi el 60% de la energía y el CO₂. La extracción de petróleo crudo también conduce a las más altas emisiones de CO, CH₄, COVDM y partículas de las fases del ciclo de vida estudiadas.

Jullien et al. (2006) realizaron un estudio experimental de la construcción de carreteras y el reciclaje de pavimento utilizando el marco del ACV. Estudiaron cuatro mezclas asfálticas equivalentes con diferentes tasas de reciclaje donde se determinaron y compararon las emisiones al aire, emisiones de contaminantes a través del tiempo y el olor relacionado con el asfalto; Una del 0% (todo el material nuevo), otra al 10%, 20% y 30% de pavimento de asfalto reciclado. Hicieron mediciones in situ de las emisiones en el aire utilizando un sensor de gas de flujo. Utilizaron una carretera de 600 metros dividida en cuatro secciones, cada una con diferente tasa de reciclaje y la unidad funcional fue un metro cuadrado de asfalto. El resultado mostró que algunas emisiones de gases aumentan con la tasa de reciclado, mientras que disminuyen los olores.

Eriksson et al. (1996) realizaron un ACV de la utilización de la carretera respecto a las actividades de transporte y productos utilizados para el transporte por carretera, es decir, la quema de combustibles, la producción de combustible, la producción y el final de la vida útil de los vehículos, y la producción, uso y fin de su vida útil para los neumáticos. El objetivo del proyecto era desarrollar la ACV para el transporte que se pudiera utilizar como entrada a ACV de sistemas similares. El resultado del análisis fue que la producción, el mantenimiento y el uso de los vehículos contribuyen sustancialmente al impacto ambiental total de transporte que se mide por kilómetros.

3.4. BASES DE DATOS Y HERRAMIENTAS DE ACV

En el sitio de la Comisión Europea para el Centro Común de Investigación (JRC) hay una página dedicada al ACV. En este sitio hay una lista de varias herramientas de ACV y bases de datos con enlaces a más información. Algunos de ellos son de descarga gratuita. El acceso gratuito es también el caso de la base de datos de código abierto llamado ACV COLUMNNA @ CPM, donde los datos son transparentes y de calidad.

No se ha realizado ninguna evaluación sobre la conveniencia de estas herramientas y bases de datos para ser utilizadas dentro de los ACV de carreteras.

Durante los últimos años, se han desarrollado herramientas dirigidas específicamente a las carreteras y / o pavimentaciones. Basándose en el resultado de su estudio, Mroueh et al. (2001) desarrollaron un programa de análisis de inventario del ciclo de vida basado en Excel para la construcción de carreteras. Cubre las etapas de trabajo de la producción de material para el mantenimiento de carreteras y los materiales que se usan más comúnmente en la construcción de carreteras. Aunque, en el momento de la publicación del artículo, el programa se limitaba a

calcular y comparar las cargas ambientales sólo de la construcción.

Stripple (2001) construyó un modelo, llamado Road Model, que consiste en diferentes procesos que se pueden elegir y juntar para dar una descripción más representativa del tramo estudiado. El modelo se desarrolló utilizando Excel y está construido por una serie de hojas de trabajo para los datos de entrada y salida. El modelo de carretera incluye la construcción, puesta en obra y mantenimiento y el análisis de inventario. Incluye el uso de recursos, parámetros de energía y las emisiones de CO₂, NO_x y SO₂. Además, se estima la energía inherente a la capa de asfalto, es decir, la energía como materia prima. Otros efectos que pueden ser considerados de importancia, tales como el ruido y las indemnizaciones efectos no se incluyen en el diseño actual del modelo.

El modelo ROAD-RES utilizado por Birgisdottir (2007) es una herramienta de evaluación del ciclo de vida, especialmente desarrollado para la gestión de residuos de incineración. Es un programa de software basado en C ++ y la base de datos Paradox (Birgisdottir, 2005). El modelo calcula un inventario de los intercambios ambientales en el ciclo de vida de una carretera. Para el sistema de carreteras cubre las etapas de diseño, construcción (movimiento de tierras, pavimentos, trabajo adicional), operación (mantenimiento y servicio de invierno) y demolición (extracción de materiales, la rehabilitación del área). Se incluyen etapas como la extracción y el mejoramiento de los recursos. El modelo puede ser utilizado para evaluar los impactos ambientales y el consumo de recursos en las etapas del ciclo de vida de la construcción de carreteras y para evaluar y comparar el vertido de residuos de incineración con su uso en la construcción de carreteras.

El modelo GRM4 ERM utilizado por Hoang et al. (2005) tiene por objeto calcular el consumo de materias primas, el consumo de energía y las emisiones de contaminantes procedentes de los procesos de construcción inicial de la carretera, la explotación y el mantenimiento. La ERM es el inventario de cargas ambientales y la GRM es la evaluación de los impactos ambientales. Las diferentes etapas incluyen la fabricación de la materia prima y el transporte al sitio de construcción. También están incluidos los equipamientos para los trabajos de carreteras durante la construcción del pavimento y el mantenimiento. Sin embargo, la extracción de materia prima y la etapa final de su vida útil no está dentro de los límites del sistema. La ERM es modular y puede estar compuesto por diferentes tipos de capas de firmes de carreteras o movimientos de tierra, y con diversos materiales, y que se puede adaptar a varios estudios de casos diferentes.

Huang et al. (2009) desarrollaron un modelo de ACV basado en hoja de cálculo en Excel para la estimación que presentan resultados del inventario. Consta de 5 hojas de cálculo de los cuales dos representan los parámetros de los procesos y el pavimento que son específicos para un proyecto. Los otros tres son: el inventario con fórmulas de cálculo y el inventario del ciclo de vida de los procesos unitarios; "inventario de proyectos", donde se presentan los resultados del inventario; y los "resultados de la caracterización". Los datos de estas hojas de cálculo están unidos por fórmulas de cálculo.

En ECRPD y dentro del paquete de trabajo en relación con ACV se produjo un modelo de hoja de cálculo que calcular el consumo de energía, uso de recursos y las emisiones para cada elemento de trabajo que se requiere para la fabricación y colocación de materiales de pavimento actuales y nuevos (ECRPD, 2009). El modelo se desarrolló en Excel y es transparente, donde los datos de entrada se pueden cambiar fácilmente. La entrada en el modelo de hoja de cálculo se hizo en consulta dentro del consorcio en cuanto a materiales, tipos y porcentaje de los materiales dentro de las mezclas, máquinas para la construcción, transporte de material, la práctica de

colocación, etc.

Una herramienta recientemente desarrollada para el cálculo de la huella de carbono de asfalto es asPECT, fruto de la investigación en colaboración con la Dirección General de Carreteras, Productos Minerales Asociación, Asociación refinado Betún y TRL Limited de Gran Bretaña. Este modelo ofrece una metodología para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de asfalto usadas en carreteras.

Inicialmente la medición de las emisiones se priorizó como el tema clave de sostenibilidad. Por lo tanto, el objetivo del proyecto era desarrollar un método estandarizado para medir la contribución al cambio climático de los productos y aplicaciones de carretera. El aspecto del método facilita la medición de la contribución 'de toda la vida' de los productos de la carretera con el cambio climático. Las fases del ciclo de vida son la adquisición de materias primas, el transporte y el procesado, el transporte de material procesado, la producción de componentes de carreteras, transporte de material a la obra, la instalación y el esquema de las obras específicas. El mantenimiento y el final de la vida no están incluidos.

La International Road Federation de Ginebra ha desarrollado una calculadora de GEI llamado CHANGER (Calculadora de Evaluación armonizado, y la normalización de las emisiones de gases de efecto invernadero para carreteras), que está diseñado específicamente para la construcción de carreteras y proyectos de rehabilitación. Se estima la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero liberados en el curso de un proyecto de construcción de carreteras. Utiliza una modelización de entrada-salida, el enfoque en el que el modelo de cálculo se basa consiste en un conjunto de ecuaciones que permiten la evaluación de las emisiones globales que han sido generadas por cada fuente, identificación y cuantificación. LAVOC6 ha analizado y validado la calidad y la fiabilidad de las bases de datos y los procedimientos de cálculo.

4. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El principal objetivo de este estudio es cuantificar las cargas ambientales y los potenciales impactos de los tres tipos de mezclas sujetos a estudio: mezclas bituminosas en caliente, mezclas semicaliente y mezclas semicalientes con un porcentaje de material reciclado en su composición. La comparación de las tres alternativas en función de los impactos ambientales de cada una de ellas permitirá obtener el tipo de mezcla que mejor satisface los requisitos medioambientales. En otras palabras, revelar cuál de las mezclas produce el menor impacto sobre el medio ambiente.

También se persigue desarrollar una herramienta de análisis del ciclo de vida de mezclas bituminosas de fácil aplicación que arroje resultados de sencilla interpretación. La metodología persigue ser aplicable a todo tipo de mezclas.

4.2. ESCENARIOS

4.2.1. Mezclas Bituminosas en Caliente

4.2.1.1. Materiales

La denominación de la mezcla está adaptada a la nomenclatura europea establecida en UNE-EN 13108-1. Se trata de una mezcla AC-16-surf-50/70-S fabricada a 165°C para su colocación como capa de rodadura: mezcla del tipo hormigón bituminoso con un tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien del total del árido correspondiente a 16 milímetros. La tabla 9 y la figura 27 muestran la dosificación de la mezcla en cuestión.

AC16S				
Huso	% Pasa	% Centro Huso AC16	Límite inferior AC16	Límite superior AC16
22	100,00	100	100	100
16	100,00	95	90	100
8	69,00	67,5	60	75
4	46,00	42,5	35	50
2	32,50	31	24	38
0,5	17,00	16	11	21
0,25	11,00	11	7	15
0,063	6,00	5	3	7

Tabla 9 Dosificación.

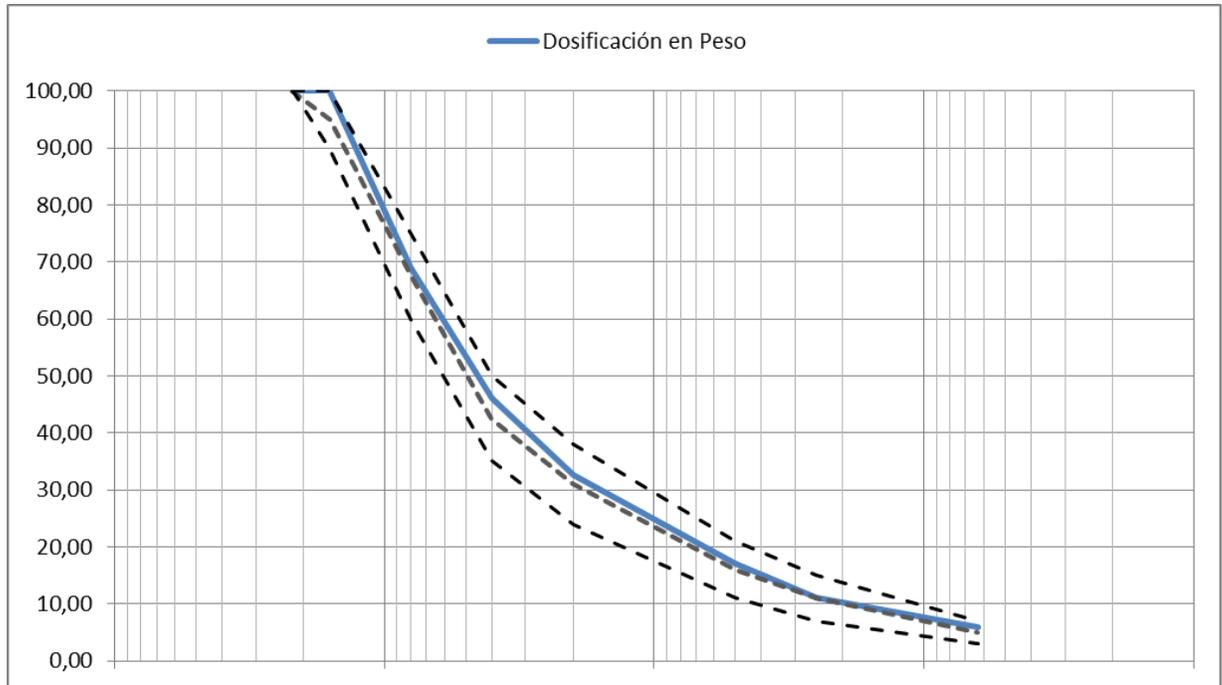


Fig. 27 Dosificación.

El ligante hidrocarbonado 50/70 comercializado por Cepsa, cumple con las especificaciones del B 50/70 del artículo 211 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en el Anexo Nacional de la norma UNE EN 12591 para el betún 50/70.

Se ha considerado un espesor acorde con la normativa vigente igual a 5 centímetros. A continuación se muestra la dotación de ligante utilizada en la tabla 10

Característica	Unidad	Norma	mín.	máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C)	0,1 mm	EN 1426	50	70
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46	54
Punto de rotura Fraass	°C	EN 12593	-	-8
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	230	-
Resistencia al endurecimiento a 163 °C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	EN 1426	50	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

Tabla 10 Especificaciones del ligante.

Dosificación Peso Mezcla AC-16-S	
% betún/áridos:	5,0
% betún/mezcla:	4,8

Tabla 11 Dotación de ligante

4.2.1.2. Descripción del ciclo de vida

El ciclo de vida de este producto se puede sintetizar en el esquema de la figura 28, el completo ciclo de vida de una mezcla bituminosa destinada capas de rodadura se divide en cinco etapas. Solo en las etapas de construcción, uso, mantenimiento y reciclado se produce un impacto sobre el medio ambiente.



Fig. 28 Esquema del ciclo de vida.

La fase de uso, por no disponer de datos suficientemente fiables, queda fuera del este ACV. Además, la fase de construcción incluye fabricación, el transporte y el empleo de equipos y maquinaria para su puesta en obra, como se muestra en la figuras 29.

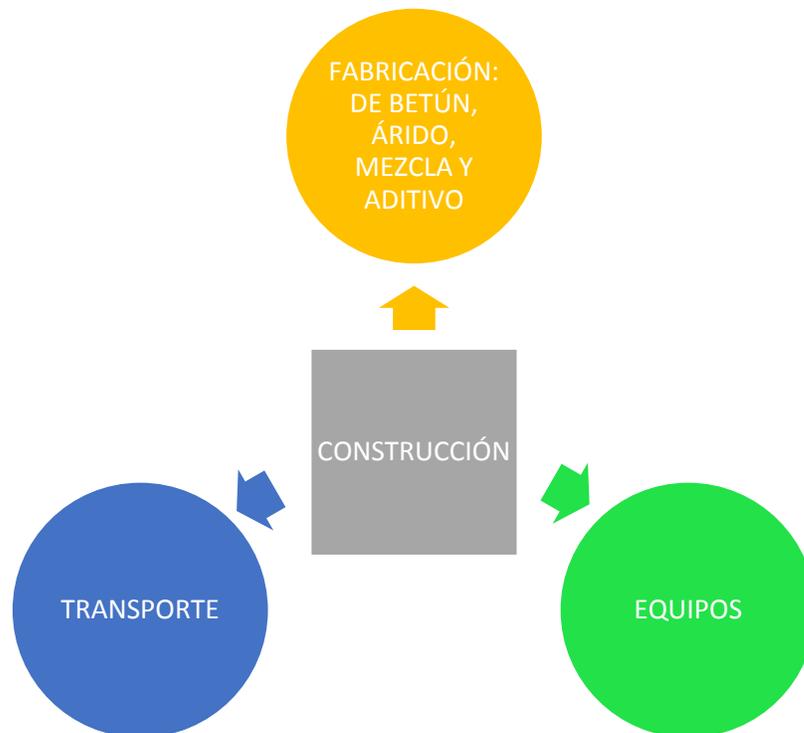


Fig. 29 Esquema interno de las fases de Construcción.

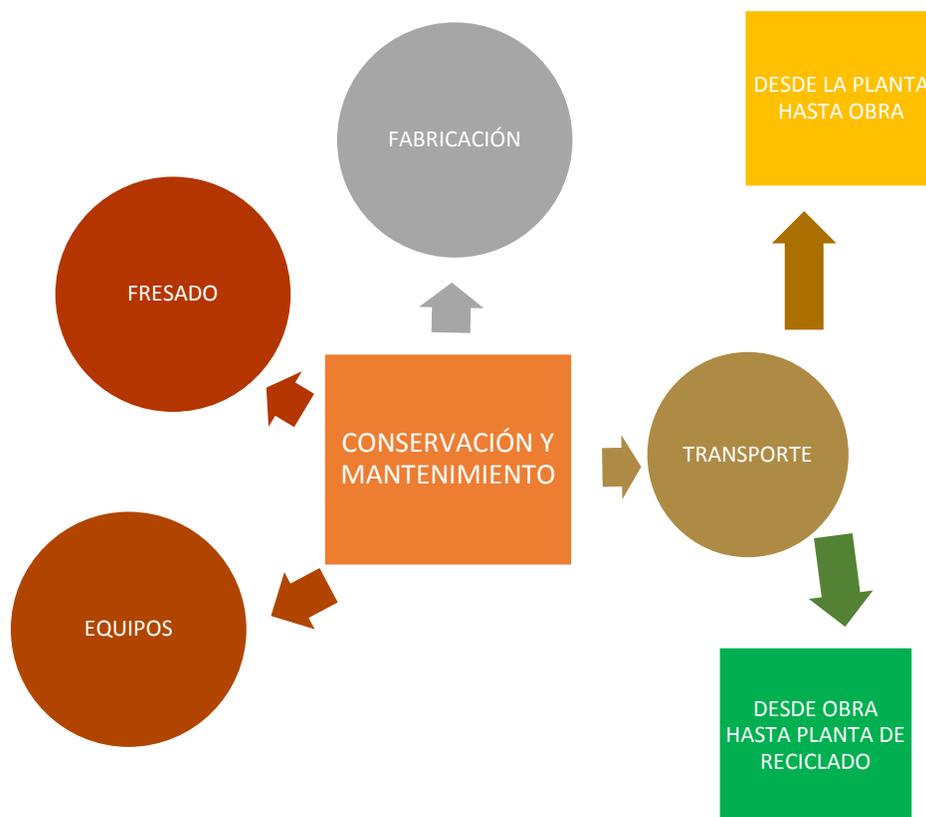


Fig. 30 Esquema interno de la fase de Conservación y Mantenimiento.

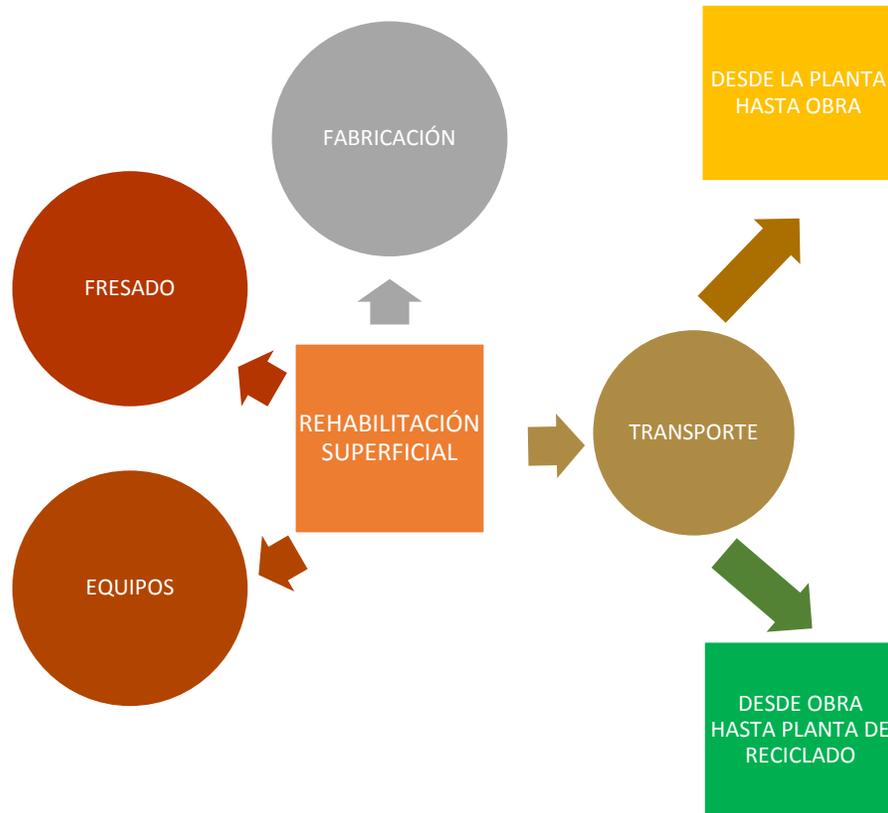


Fig. 31 Esquema interno de la fase de Rehabilitación superficial.

Las últimas etapas del ciclo de vida son la Conservación y Mantenimiento (Fig.30) y la Rehabilitación Superficial (Fig.31), que suman el fresado del asfalto envejecido a las otras tres etapas.

Las distancias de transporte consideradas en el estudio han sido seleccionadas en base a la información de un estudio similar precedente (*Life-cycle assessment for road Construction and use, EUROPAVE*).

- Distancia de transporte de materiales desde la cantera hasta la planta asfáltica de 50km.
- Distancia de transporte de la mezcla asfáltica desde planta asfáltica hasta la obra: 20km.

4.2.1.2.1. Construcción

La construcción de la capa de rodadura ejecutada con mezcla asfáltica comienza, como suele suceder con cualquier producto, con la extracción y procesado de las materias primas. En el caso de una mezcla bituminosa, las materias primas son dos: el árido y el ligante bituminoso.

El árido se extrae de la cantera y es transportado hasta la planta donde pasa por varios procesos de machaqueo y lavado hasta que adquiere las características requeridas. El caso del ligante, en líneas generales, es muy similar. Tras su obtención, recordamos que el ligante bituminoso es un producto que deriva del petróleo, es sometido a un refinado para su posterior utilización.

La siguiente fase, antes del mezclado, es el transporte de las materias primas procesadas hasta la planta de producción de mezclas asfálticas. En esta fase los actores principales son los medios

de transporte utilizados. Una vez se tienen todos los componentes en la planta de fabricación del asfalto se pone en marcha el proceso de mezclado. Durante el proceso los materiales deberán ser calentados con el fin de lograr una buena mezcla.

El paso siguiente, es el transporte desde la planta de producción hasta el sitio donde se localiza la Obra a acometer. De nuevo es el camión el que interviene en esta fase. Esto es debido a que para este estudio se ha tenido a bien considerar que todo el transporte se realiza por carretera. La última etapa es ya la puesta en obra del material. Esta etapa se subdivide en dos fases bien diferenciadas: el extendido y la compactación.

Para el extendido se emplea una extenderdora autopropulsada con una producción horaria de toneladas. El consumo de esta máquina es de 49,10 l/h. Por otra parte, para la compactación se utilizan dos tipos de compactadora. La primera es una compactadora de rodillos metálicos. Este tipo de compactadora se encarga de realizar el grueso de la compactación, su producción es de 325 toneladas a la hora. La segunda compactadora es una de tipo neumático, su uso está destinado a corregir los pequeños defectos que hayan podido quedar en la parte en contacto con el neumático de los vehículos durante la fase de uso.

Para la construcción de la carretera se ha considerado el ancho de 7 metros y un espesor constante de 5 centímetros según el PG-3 (Tab.12)

TIPO DE CAPA	ESPESOR (cm)	TIPO DE MEZCLA	
		Denominación UNE-EN 13108-1(*)	Denominación anterior
RODADURA	4 – 5	AC16 surf D AC16 surf S	D12 S12
	> 5	AC22 surf D AC22 surf S	D20 S20
INTERMEDIA	5-10	AC22 bin D	D20
		AC22 bin S	S20
		AC32 bin S	S25
		AC 22 bin S MAM (**)	MAM(**)
BASE	7-15	AC32 base S	S25
		AC22 base G	G20
		AC32 base G	G25
		AC 22 base S MAM (***)	MAM(***)
ARCENES(****)	4-6	AC16 surf D	D12

(*) Se ha omitido en la denominación de la mezcla la indicación del tipo de ligante por no ser relevante a efectos de esta tabla.

(**) Espesor mínimo de seis centímetros (6 cm).

(***) Espesor máximo de trece centímetros (13 cm).

(****) En el caso de que no se emplee el mismo tipo de mezcla que en la capa de rodadura de la calzada.

Tabla 12 Tipo de mezcla a utilizar en función del tipo de capa y espesor.

4.2.1.2.2. Conservación y Mantenimiento

Después de haber establecido el diagnóstico sobre el estado de cada tramo homogéneo y el nivel de sus deterioros, se analizarán las soluciones de conservación posibles y se proyectará la más

apropiada en cada caso. La renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse si se produce alguno de los supuestos siguientes:

- Cuando no sea necesaria una rehabilitación estructural, de acuerdo con lo indicado en esta norma, pero el estado superficial del pavimento presente deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario o a la durabilidad del pavimento. Las deficiencias son las siguientes:
 - Pavimento deslizante por pulimento o por falta de macrotextura.
 - Pavimento deformado longitudinal o transversalmente, con una regularidad superficial inadecuada.
 - Pavimento fisurado, descarnado o en proceso de desintegración superficial.
- Cuando existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial.
- Por razones de conservación preventiva.

Una vez establecida la necesidad de mantenimiento de un firme o pavimento de carretera, la determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las siguientes etapas en el caso más general:

- Recopilación y análisis de datos.
- Evaluación del estado del firme y de su nivel de agotamiento.
- Diagnóstico sobre el estado del firme.
- Análisis de soluciones y selección del tipo más apropiado.
- Proyecto de la solución adoptada.

En algunos casos, las etapas anteriores se podrán simultanear o simplificar, según sea la naturaleza de los deterioros del firme y la técnica que se vaya a utilizar. Se evaluará por medio de una inspección visual y de una auscultación. Aunque en realidad, la selección y el proyecto de la solución se individualizarán para cada uno de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme que se hayan determinado, basándose en la inspección visual y en la auscultación del firme y, en especial, en el estudio de las deflexiones. A las zonas singulares que pudieran existir dentro de cada tramo homogéneo se les aplicará la solución específica que les corresponda.

En acogimiento a la normativa vigente recogida en la orden FOM/3459/2003 (BOE) y tras consultar a la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Cantabria y la información extraída de Economic Evaluation of Long-Life Pavements (OECD), para el presente estudio se ha tenido a bien considerar, en primer lugar, que se realizará una única intervención al octavo año desde su construcción, esta hipótesis no es aleatoria sino que se ha hecho en base a la experiencia de técnicos de la Demarcación de Carreteras de Cantabria y a la edad media en la que se lleva a cabo en otros países del mundo. Así pues, el área afectada se calcula próxima al quince por ciento del total viario (15%).

Eliminación parcial y reposición del firme existente

Así, a los 8 años de la construcción de la carretera, se llevará a cabo una eliminación y retirada por medios mecánicos de los materiales que componen el firme hasta la profundidad precisa y

su reposición con el mismo espesor de mezclas bituminosas. La eliminación parcial de las capas aglomeradas en firmes con pavimento bituminoso se realizará siempre mediante técnicas de fresado. Aunque en firmes muy flexibles con un espesor total de materiales bituminosos inferior a seis centímetros (6 cm), podría eventualmente considerarse el empleo de otros procedimientos.

La eliminación parcial y reposición alcanzarán a todas las zonas y capas del firme que presenten agotamiento estructural o vida residual insuficiente. Para la delimitación de la superficie y de la profundidad de esta solución se partirá de los valores de la deflexión patrón en los diferentes puntos de medida y de los resultados de una inspección visual detallada.

Se considerará que existe agotamiento estructural del firme cuando se observe en su superficie un agrietamiento de tipo estructural (zonas del carril cuarteadas en malla gruesa o fina y zonas de las rodadas con grietas longitudinales, ramificadas o no). En este caso, si no se conoce la profundidad del agrietamiento, se procederá a un reconocimiento más detallado del firme del carril mediante la extracción de testigos y la ejecución de calicatas escalonadas capa a capa. La eliminación parcial de firme y su posterior reposición deberá alcanzar la profundidad necesaria, o hasta la capa cuya superficie no presente agrietamiento estructural.

En este caso, entre las posibles soluciones de conservación y mantenimiento de firmes disponible para capas bituminosas, se ha optado por la siguiente solución:

El fresado del área afectada del firme existente y reposición con mezcla bituminosa hasta la misma cota que la superficie original del pavimento existente.

Una vez se ha realizado el fresado se aplica un riego de ligante que sirva para aumentar la adherencia entre el material que se encuentra debajo y la nueva mezcla.

Inmediatamente después se extiende la mezcla y se compacta con una compactadora de rodillos y otra neumática.

4.2.1.2.3. Rehabilitación Superficial

La rehabilitación o renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse debido a causas muy similares a las de conservación y mantenimiento, extendidas a la totalidad del tramo.

- Cuando, realizada la tramificación según lo indicado en el apartado 6.1, existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial, pero estén comprendidos entre dos contiguos que sí la necesitan, podrá ser conveniente dar continuidad a la superficie de rodadura, por criterios de uniformidad funcional.
- Por razones de conservación preventiva, en ciertos casos convendrá aplicar el criterio anterior a tramos o grupos de tramos de longitud mayor, en los que, de acuerdo con esta norma, no sea estrictamente necesaria la rehabilitación (estructural o superficial), pero se prevea que lo vaya a ser a corto plazo.

Una vez establecida la necesidad de la rehabilitación superficial de un firme o pavimento de carretera, la determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las mismas etapas que en el proceso de conservación.

En algunos casos, las etapas anteriores se podrán simultanear o simplificar, según sea la naturaleza de los deterioros del firme y la técnica de rehabilitación que se vaya a utilizar.

La fase de rehabilitación superficial se realizará al término de la vida útil de la capa en cuestión, que para este estudio ha sido estimada con la ayuda de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Cantabria y la información extraída de Economic Evaluation of Long-Life Pavements (OECD). La vida útil será de 12 años. Consistirá en la eliminación total mediante el fresado de la capa de rodadura, la fabricación de nueva mezcla bituminosa y su puesta en obra, incluyendo los procesos de extendido a través de la extendidora empleada en la fase de construcción y la compactación, siguiendo las mismas directrices que han servido para la construcción inicial de la pavimentación.

Se considera como fin de la vida útil, el momento en el que la pavimentación no sea en grado de garantizar las prestaciones de servicio.

4.2.2. Mezclas Bituminosas Semicalientes

4.2.2.1. Materiales

La denominación de la mezcla está adaptada a la nomenclatura europea establecida en UNE-EN 13108-1. Se trata de una mezcla AC-16-surf-50/70-S con la adición de una cera: mezcla del tipo hormigón bituminoso con un tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien del total del árido correspondiente a 16 mm.

AC16S				
Huso	% Pasa	% Centro Huso AC16	Límite inferior AC16	Límite superior AC16
22	100,00	100	100	100
16	100,00	95	90	100
8	69,00	67,5	60	75
4	46,00	42,5	35	50
2	32,50	31	24	38
0,5	17,00	16	11	21
0,25	11,00	11	7	15
0,063	6,00	5	3	7

Tabla 13 Dosificación.

Característica	Unidad	Norma	mín.	máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C)	0,1 mm	EN 1426	50	70
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46	54
Punto de rotura Fraass	°C	EN 12593	-	-8
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	230	-
Resistencia al endurecimiento a 163 °C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	EN 1426	50	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

Tabla 14 Especificaciones del ligante.

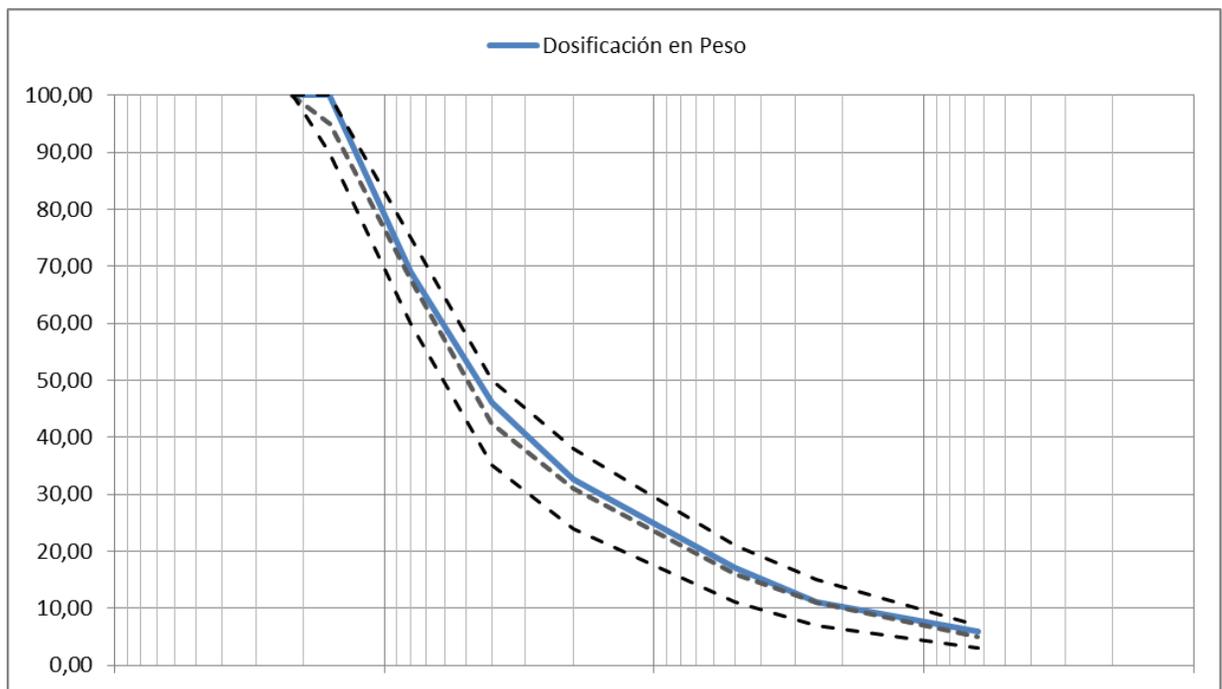


Fig. 32 Dosificación.

La tabla 13 y la figura 32 muestran la dosificación de la mezcla en cuestión. Su empleo está destinado

a capas de rodadura (surf). La adición de la cera de tipo “Kemfluid 220-G” no aumenta el tiempo de mezclado, lo que significa que la fabricación de la mezcla (su producción horaria) no varía. Es decir, el tiempo de fabricación es el mismo. Sin embargo la temperatura sí que disminuye. La temperatura de fabricación de la mezcla semiclientes es de 135°C. El ligante hidrocarbonado 50/70 comercializado por Cepsa, que cumple con las especificaciones del B 50/70 del artículo

211 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en el Anexo Nacional de la norma UNE EN 12591 para el betún 50/70.

Se ha considerado un espesor acorde con la normativa vigente igual a 5 centímetros. Para reducir la temperatura de producción de mezcla asfáltica se ha empleado la cera “Kemfluid 220-G”. A continuación se muestra la dotación de ligante utilizada en la tabla 15.

Dosificación Peso Mezcla AC-16-S	
% betún/áridos:	5,0
% betún/mezcla:	4,8
% Cera/betún	3

Tabla 15 Dotación de ligante.

4.2.2.2. Descripción del ciclo de vida

El ciclo de vida de este producto se puede sintetizar en el esquema de la figura 33, el completo ciclo de vida de una mezcla bituminosa destinada capas de rodadura se divide en cinco etapas. Solo en las etapas de construcción, uso, mantenimiento y reciclado se produce un impacto sobre el medio ambiente.



Fig. 33 Esquema del ciclo de vida.

La fase de uso, por no disponer de datos suficientemente fiables, queda fuera del este ACV. Además, la fase de construcción incluye fabricación, el transporte y el empleo de equipos y maquinaria para su puesta en obra, como se muestra en la figuras 34.

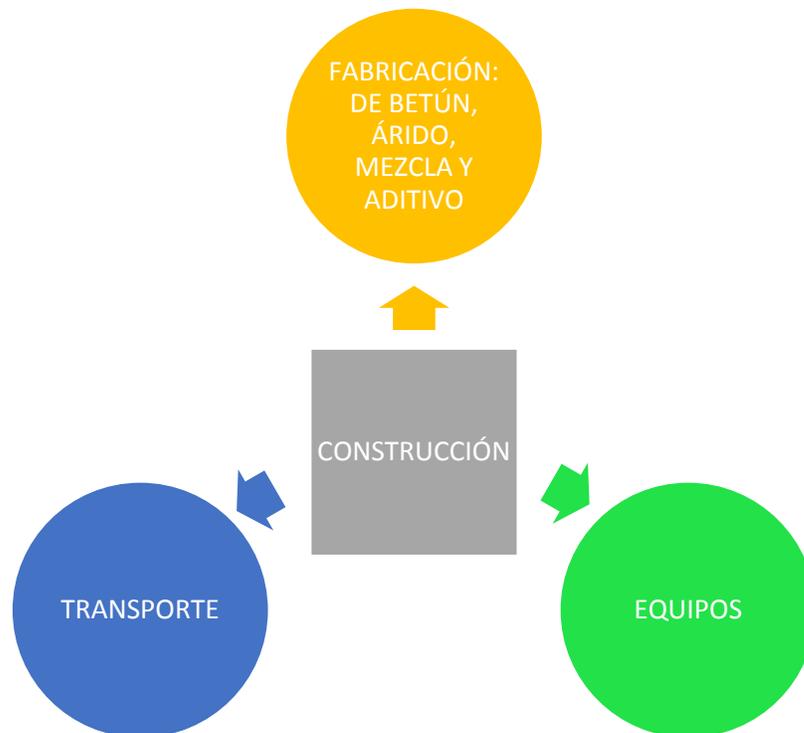


Fig. 34 Esquema interno de las fases de Construcción.

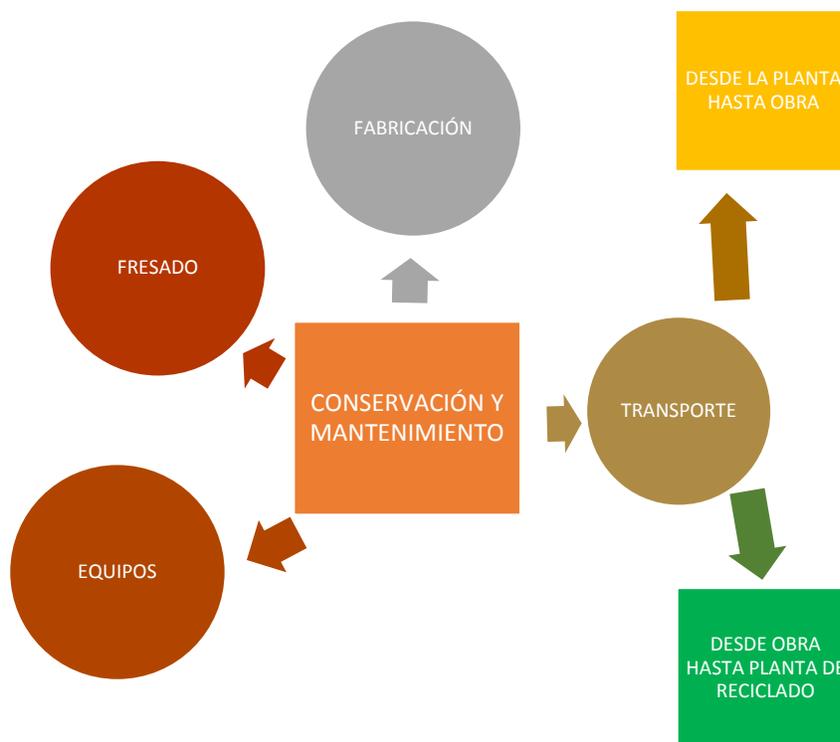


Fig. 35 Esquema interno de la fase de Conservación y Mantenimiento.

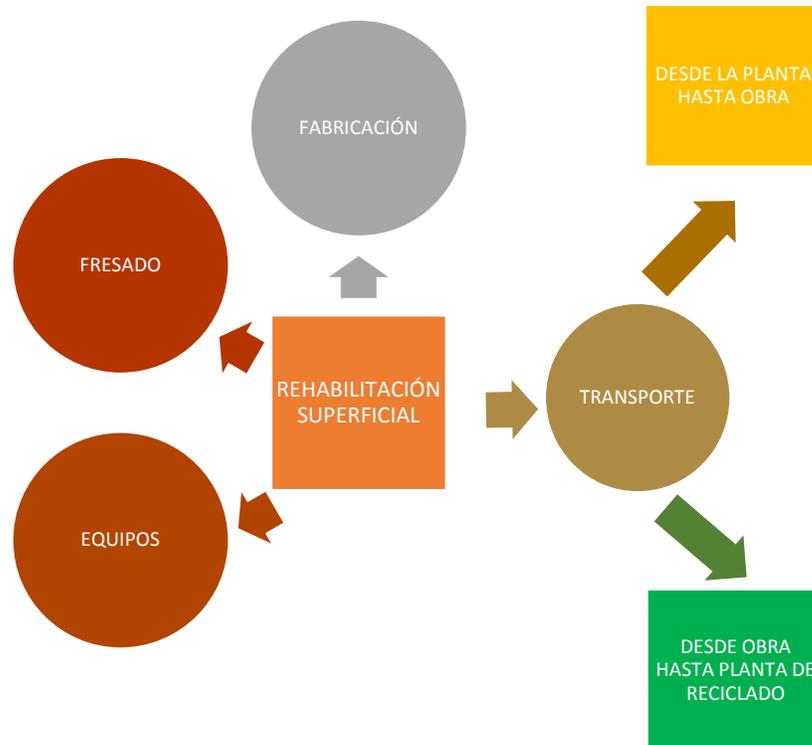


Fig. 36 Esquema interno de la fase de Rehabilitación Superficial.

Las últimas etapas del ciclo de vida son la Conservación y Mantenimiento (Fig.35) y la Rehabilitación Superficial (Fig.36), que suman el fresado del asfalto envejecido a las otras tres etapas.

Las distancias de transporte consideradas en el estudio han sido seleccionadas en base a la información de un estudio similar precedente (*Life-cycle assessment for road Construction and use, EUROPAVE*).

- Distancia de transporte de materiales desde la cantera hasta la planta asfáltica de 50km.
- Distancia de transporte de la mezcla asfáltica desde planta asfáltica hasta la obra: 20km.

4.2.2.2.1. Construcción

La construcción de la capa de rodadura ejecutada con mezcla asfáltica comienza, como suele suceder con cualquier producto, con la extracción y procesado de las materias primas. En el caso de una mezcla bituminosa, las materias primas son dos: el árido y el ligante bituminoso.

El árido se extrae de la cantera y es transportado hasta la planta donde pasa por varios procesos de machaqueo y lavado hasta que adquiere las características requeridas.

El caso del ligante, en líneas generales, es muy similar. Tras su extracción, recordamos que el ligante bituminoso es un producto que deriva del petróleo, es sometido a un refinado para su posterior utilización.

La siguiente fase, antes del mezclado, es el transporte de las materias primas procesadas hasta la planta de producción de mezclas asfálticas. En esta fase los actores principales son los medios

de transporte utilizados.

Una vez se tienen todos los componentes en la planta de fabricación del asfalto se pone en marcha el proceso de mezclado. Durante el proceso los materiales deberán ser calentados con el fin de lograr una buena mezcla.

El paso siguiente, es el transporte desde la planta de producción hasta el sitio donde se localiza la Obra a acometer. De nuevo es el camión el que interviene en esta fase. Esto es debido a que para este estudio se ha tenido a bien considerar que todo el transporte se realiza por carretera.

La última etapa es ya la puesta en obra del material. Esta etapa se subdivide en dos fases bien diferenciadas: el extendido y la compactación.

Para el extendido se emplea una extenderdora autopropulsada con una producción horaria de toneladas. El consumo de esta máquina es de 49,10 l/h.

Por otra parte, para la compactación se utilizan dos tipos de compactadora. La primera es una compactadora de rodillos metálicos. Este tipo de compactadora se encarga de realizar el grueso de la compactación, su producción es de 325 toneladas a la hora. La segunda compactadora es una de tipo neumático, su uso está destinado a corregir los pequeños defectos que hayan podido quedar en la parte en contacto con el neumático de los vehículos durante la fase de uso.

Para la construcción de la carretera se ha considerado el ancho de 7 metros y un espesor constante de 5 centímetros (Tab.15)

TIPO DE CAPA	ESPESOR (cm)	TIPO DE MEZCLA	
		Denominación UNE-EN 13108-1(*)	Denominación anterior
RODADURA	4-5	AC16 surf D AC16 surf S	D12 S12
	> 5	AC22 surf D AC22 surf S	D20 S20
INTERMEDIA	5-10	AC22 bin D AC22 bin S AC32 bin S AC 22 bin S MAM (**)	D20 S20 S25 MAM(**)
		AC32 base S AC22 base G AC32 base G AC 22 base S MAM (***)	S25 G20 G25 MAM(***)
ARCENES(****)	4-6	AC16 surf D	D12

(*) Se ha omitido en la denominación de la mezcla la indicación del tipo de ligante por no ser relevante a efectos de esta tabla.

(**) Espesor mínimo de seis centímetros (6 cm).

(***) Espesor máximo de trece centímetros (13 cm).

(****) En el caso de que no se emplee el mismo tipo de mezcla que en la capa de rodadura de la calzada.

Tabla 16 Tipo de mezcla a utilizar en función del tipo de capa y espesor.

4.2.2.2. Conservación y Mantenimiento

Después de haber establecido el diagnóstico sobre el estado de cada tramo homogéneo y el nivel de sus deterioros, se analizarán las soluciones de conservación posibles y se proyectará la más apropiada en cada caso. La renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse si se produce alguno de los supuestos siguientes:

- Cuando no sea necesaria una rehabilitación estructural, de acuerdo con lo indicado en esta norma, pero el estado superficial del pavimento presente deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario o a la durabilidad del pavimento. Las deficiencias son las siguientes:
 - Pavimento deslizante por pulimento o por falta de macrotextura.
 - Pavimento deformado longitudinal o transversalmente, con una regularidad superficial inadecuada.
 - Pavimento fisurado, descarnado o en proceso de desintegración superficial.
- Cuando existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial.
- Por razones de conservación preventiva.

Una vez establecida la necesidad de mantenimiento de un firme o pavimento de carretera, la determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las siguientes etapas en el caso más general:

- Recopilación y análisis de datos.
- Evaluación del estado del firme y de su nivel de agotamiento.
- Diagnóstico sobre el estado del firme.
- Análisis de soluciones y selección del tipo más apropiado.
- Proyecto de la solución adoptada.

En algunos casos, las etapas anteriores se podrán simultanear o simplificar, según sea la naturaleza de los deterioros del firme y la técnica que se vaya a utilizar. Se evaluará por medio de una inspección visual y de una auscultación. Aunque en realidad, la selección y el proyecto de la solución se individualizarán para cada uno de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme que se hayan determinado, basándose en la inspección visual y en la auscultación del firme y, en especial, en el estudio de las deflexiones. A las zonas singulares que pudieran existir dentro de cada tramo homogéneo se les aplicará la solución específica que les corresponda.

En acogimiento a la normativa vigente recogida en la orden FOM/3459/2003 (BOE) y tras consultar a la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Cantabria y la información extraída de Economic Evaluation of Long-Life Pavements (OECD), para el presente estudio se ha tenido a bien considerar, en primer lugar, que se realizará una única intervención al octavo año desde su construcción, esta hipótesis no es aleatoria sino que se ha hecho en base a la experiencia de técnicos de la Demarcación de Carreteras de Cantabria y a la edad media en la que se lleva a cabo en otros países del mundo. Así pues, el área afectada se calcula próxima al quince por ciento del total viario (15%).

Eliminación parcial y reposición del firme existente

Así, a los 8 años de la construcción de la carretera, se llevará a cabo una eliminación y retirada por medios mecánicos de los materiales que componen el firme hasta la profundidad precisa y su reposición con el mismo espesor de mezclas bituminosas. La eliminación parcial de las capas aglomeradas en firmes con pavimento bituminoso se realizará siempre mediante técnicas de fresado. Aunque en firmes muy flexibles con un espesor total de materiales bituminosos inferior a seis centímetros (6 cm), podría eventualmente considerarse el empleo de otros procedimientos.

La eliminación parcial y reposición alcanzarán a todas las zonas y capas del firme que presenten agotamiento estructural o vida residual insuficiente. Para la delimitación de la superficie y de la profundidad de esta solución se partirá de los valores de la deflexión patrón en los diferentes puntos de medida y de los resultados de una inspección visual detallada.

Se considerará que existe agotamiento estructural del firme cuando se observe en su superficie un agrietamiento de tipo estructural (zonas del carril cuarteadas en malla gruesa o fina y zonas de las rodadas con grietas longitudinales, ramificadas o no). En este caso, si no se conoce la profundidad del agrietamiento, se procederá a un reconocimiento más detallado del firme del carril mediante la extracción de testigos y la ejecución de calicatas escalonadas capa a capa. La eliminación parcial de firme y su posterior reposición deberá alcanzar la profundidad necesaria, o hasta la capa cuya superficie no presente agrietamiento estructural.

En este caso, entre las posibles soluciones de conservación y mantenimiento de firmes disponible para capas bituminosas, se ha optado por la siguiente solución: El fresado del área afectada del firme existente y reposición con mezcla bituminosa hasta la misma cota que la superficie original del pavimento existente. Una vez se ha realizado el fresado se aplica un riego de ligante que sirva para aumentar la adherencia entre el material que se encuentra debajo y la nueva mezcla. Inmediatamente después se extiende la mezcla y se compacta con una compactadora de rodillos y otra neumática.

4.2.2.2.3. Rehabilitación Superficial

La rehabilitación o renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse debido a causas muy similares a las de conservación y mantenimiento, extendidas a la totalidad del tramo.

- Cuando, realizada la tramificación según lo indicado en el apartado 6.1, existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial, pero estén comprendidos entre dos contiguos que sí la necesitan, podrá ser conveniente dar continuidad a la superficie de rodadura, por criterios de uniformidad funcional.
- Por razones de conservación preventiva, en ciertos casos convendrá aplicar el criterio anterior a tramos o grupos de tramos de longitud mayor, en los que, de acuerdo con esta norma, no sea estrictamente necesaria la rehabilitación (estructural o superficial), pero se prevea que lo vaya a ser a corto plazo.

Una vez establecida la necesidad de la rehabilitación superficial de un firme o pavimento de carretera, la determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las mismas etapas que en el proceso de conservación.

En algunos casos, las etapas anteriores se podrán simultanear o simplificar, según sea la

naturaleza de los deterioros del firme y la técnica de rehabilitación que se vaya a utilizar.

La fase de rehabilitación superficial se realizará al término de la vida útil de la capa en cuestión, que para este estudio ha sido estimada con la ayuda de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Cantabria y la información extraída de Economic Evaluation of Long-Life Pavements (OECD). La vida útil será de 12 años. Consistirá en la eliminación total mediante el fresado de la capa de rodadura, la fabricación de nueva mezcla bituminosa y su puesta en obra, incluyendo los procesos de extendido a través de la extendidora empleada en la fase de construcción y la compactación, siguiendo las mismas directrices que han servido para la construcción inicial de la pavimentación.

Se considera como fin de la vida útil, el momento en el que la pavimentación no sea en grado de garantizar las prestaciones de servicio.

4.2.3. Mezclas Bituminosas Semiclientes + RAP

4.2.3.1. Materiales

La denominación de la mezcla está adaptada a la nomenclatura europea establecida en UNE-EN 13108-1. Se trata de una mezcla AC-16-surf-50/70-S: mezcla del tipo hormigón bituminoso con un tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien del total del árido correspondiente a 16 mm.

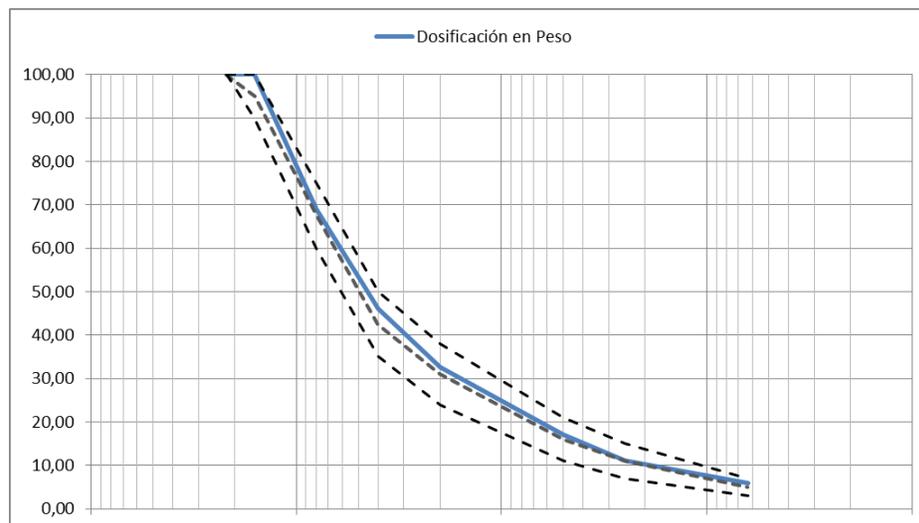


Fig. 37 Dosificación.

AC16S				
Huso	% Pasa	% Centro Huso AC16	Límite inferior AC16	Límite superior AC16
22	100,00	100	100	100
16	100,00	95	90	100
8	69,00	67,5	60	75
4	46,00	42,5	35	50
2	32,50	31	24	38
0,5	17,00	16	11	21
0,25	11,00	11	7	15
0,063	6,00	5	3	7

Tabla 17 Dosificación.

Su empleo está destinado a capas de rodadura (surf). La adición de la cera de tipo “Kemfluid 220-G” no aumenta el tiempo de mezclado, lo que significa que la fabricación de la mezcla (su producción horaria) no varía. Es decir, el tiempo de fabricación es el mismo. Sin embargo la temperatura sí que disminuye.

La temperatura de fabricación de la mezcla semicalientes es de 135°C. Asumimos que se calienta a la misma temperatura que las mezclas bituminosas semicalientes sin RAP (135°C), a pesar de llevar RAP.

El ligante hidrocarbonado 50/70 comercializado por Cepsa, que cumple con las especificaciones del B 50/70 del artículo 211 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en el Anexo Nacional de la norma UNE EN 12591 para el betún 50/70.

Se ha considerado un espesor acorde con la normativa vigente igual a 5 centímetros.

Característica	Unidad	Norma	mín.	máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C)	0,1 mm	EN 1426	50	70
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46	54
Punto de rotura Fraass	°C	EN 12593	-	-8
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	230	-
Resistencia al endurecimiento a 163 °C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	EN 1426	50	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

Fig. 38 Especificaciones del ligante.

Para reducir la temperatura de producción de mezcla asfáltica a se ha empleado la cera “Kemfluid 220-G”. A continuación se muestra la dotación de ligante utilizada en la tabla 18.

Dosificación Peso Mezcla AC-16-S	
15	% de Fresado
% betún/áridos:	5,0
% betún/mezcla:	4,8
% Cera/betún	3
% betún residual:	4

Tabla 18 Dotación de ligante y cera.

Además de árido virgen, en esta mezcla ha sido utilizado árido producido mediante el fresado del asfalto puesto en obra que por su deterioro ha perdido las propiedades que garantizan un adecuado nivel de servicio. Las tablas 19 y 20 definen las características del RAP:

Granulometría RAP		
TAMICES	%	%
U.N.E.	PASA	RETENIDO
	100,0	0,0
22,0	100,0	0,0
16,0	100,0	0,0
8,0	92,1	7,9
4,0	74,7	25,3
2,0	57,9	42,1
0,500	27,7	72,3
0,250	20,2	79,8
0,125	16,7	83,3
0,063	12,5	87,5

Tabla 19 Granulometría RAP.

MEZCLA AC-16-S									
Huso	% Pasa	% Retenido	% Retenido Fracción	Peso AC-16-S (gr)	Material Fresado (gr)	Material Ofita (gr)	Material Caliza (gr)	Cemento (gr)	Total (gr)
22	100,00	0	0	0	0,00	0,00			0,00
16	100,00	0	0	0	0,00	0,00			0,00
8	69,00	31	31	372	14,21	357,79			372,00
4	46,00	54	23	276	31,33	244,67			276,00
2	32,50	67,5	13,5	162	30,25	131,75			162,00
0,5	17,00	83	15,5	186	54,34	0,00	131,66		186,00
0,25	11,00	89	6	72	13,52	0,00	58,48		72,00
0,063	6,00	94	5	60	13,86	0,00	46,14		60,00
		100	6	72	22,49	0,00		49,51	72,00
				Pesos:	180,00	734,21	236,28	49,51	1200,00
				%:	15,00	61,18	19,69	4,13	100,00

Tabla 20 Resumen de la mezcla AC-16-S.

4.2.3.2. Descripción del ciclo de vida

El ciclo de vida de este producto se puede sintetizar en el esquema de la figura 39, el completo ciclo de vida de una mezcla bituminosa destinada capas de rodadura se divide en cinco etapas. Solo en las etapas de construcción, uso, mantenimiento y reciclado se produce un impacto sobre el medio ambiente.



Fig. 39 Esquema del ciclo de vida.

La fase de uso, por no disponer de datos suficientemente fiables, queda fuera del este ACV. Además, la fase de construcción incluye fabricación, el transporte y el empleo de equipos y maquinaria para su puesta en obra, como se muestra en la figuras 40.

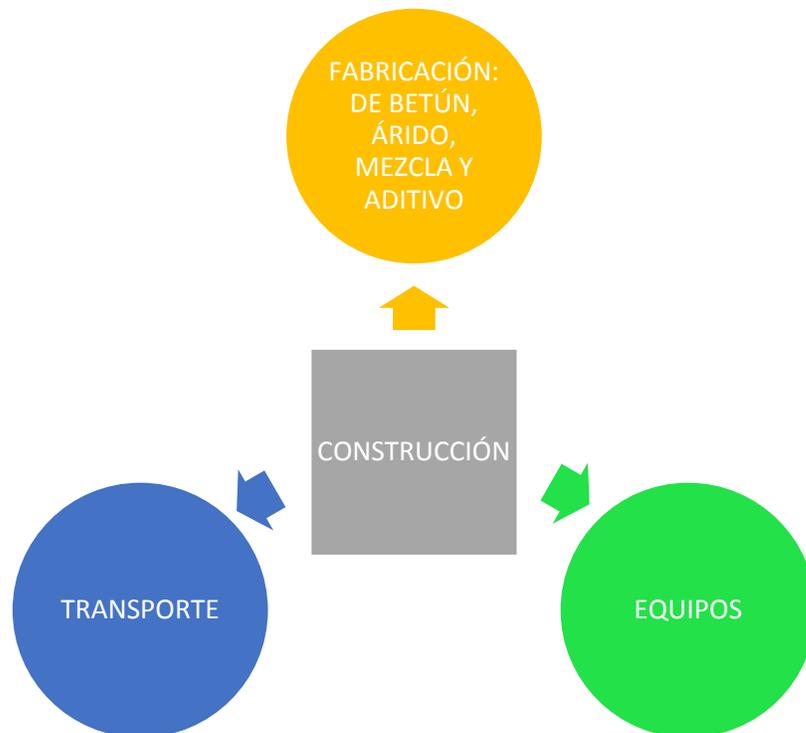


Fig. 40 Esquema interno de las fases de Construcción.

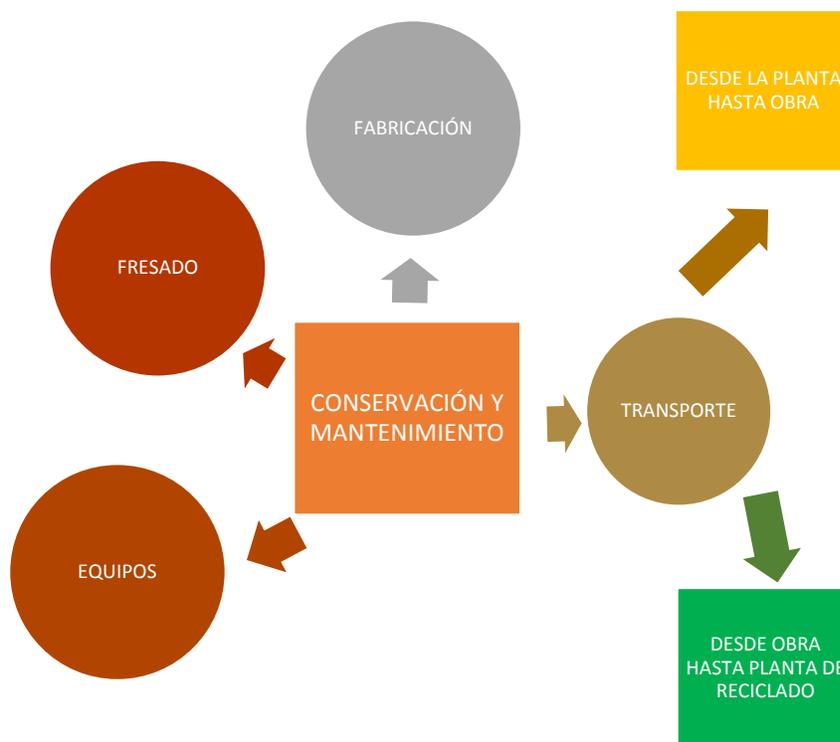


Fig. 41 Esquema interno de la fase de Conservación y Mantenimiento.

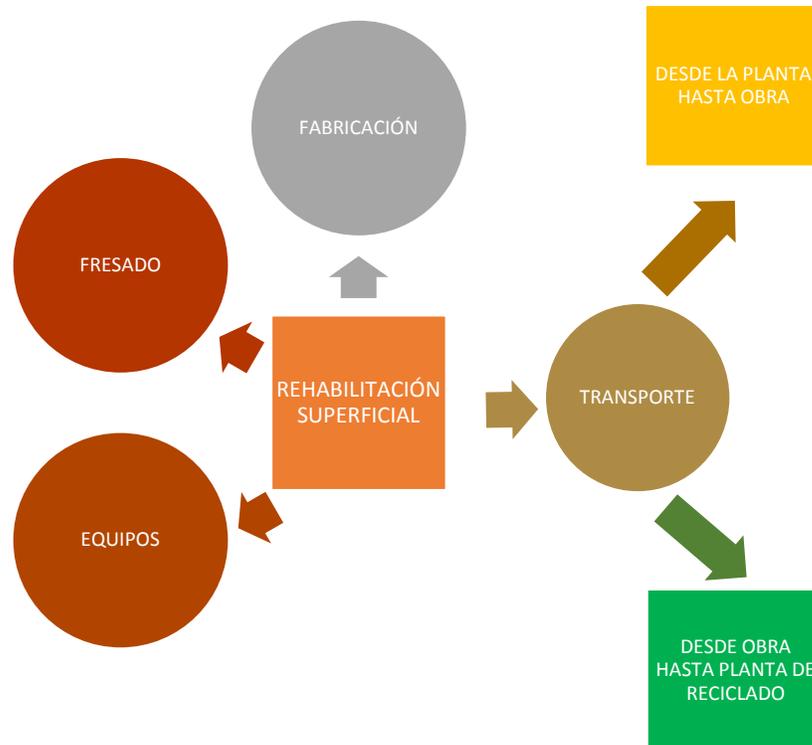


Fig. 42 Esquema interno de la fase de Rehabilitación Superficial.

Las últimas etapas del ciclo de vida son la Conservación y Mantenimiento (Fig.41) y la Rehabilitación Superficial (Fig.42), que suman el fresado del asfalto envejecido a las otras tres etapas.

Las distancias de transporte consideradas en el estudio han sido seleccionadas en base a la información de un estudio similar precedente (*Life-cycle assessment for road Construction and use, EUROPAVE*).

- Distancia de transporte de materiales desde la cantera hasta la planta asfáltica de 50km.
- Distancia de transporte de la mezcla asfáltica desde planta asfáltica hasta la obra: 20km.

4.2.3.2.1. Construcción

La construcción de la capa de rodadura ejecutada con mezcla asfáltica comienza, como suele suceder con cualquier producto, con la extracción y procesado de las materias primas. En el caso de una mezcla bituminosa, las materias primas son dos: el árido y el ligante bituminoso.

El árido se extrae de la cantera y es transportado hasta la planta donde pasa por varios procesos de machaqueo y lavado hasta que adquiere las características requeridas.

El caso del ligante, en líneas generales, es muy similar. Tras su extracción, recordamos que el ligante bituminoso es un producto que deriva del petróleo, es sometido a un refinado para su posterior utilización.

La siguiente fase, antes del mezclado, es el transporte de las materias primas procesadas hasta la planta de producción de mezclas asfálticas. En esta fase los actores principales son los medios

de transporte utilizados.

Una vez se tienen todos los componentes en la planta de fabricación del asfalto se pone en marcha el proceso de mezclado. Durante el proceso los materiales deberán ser calentados con el fin de lograr una buena mezcla.

El paso siguiente, es el transporte desde la planta de producción hasta el sitio donde se localiza la Obra a acometer. De nuevo es el camión el que interviene en esta fase. Esto es debido a que para este estudio se ha tenido a bien considerar que todo el transporte se realiza por carretera.

La última etapa es ya la puesta en obra del material. Esta etapa se subdivide en dos fases bien diferenciadas: el extendido y la compactación.

Para el extendido se emplea una extenderdora autopropulsada con una producción horaria de toneladas. El consumo de esta máquina es de 49,10 l/h.

Por otra parte, para la compactación se utilizan dos tipos de compactadora. La primera es una compactadora de rodillos metálicos. Este tipo de compactadora se encarga de realizar el grueso de la compactación, su producción es de 325 toneladas a la hora. La segunda compactadora es una de tipo neumático, su uso está destinado a corregir los pequeños defectos que hayan podido quedar en la parte en contacto con el neumático de los vehículos durante la fase de uso.

Para la construcción de la carretera se ha considerado el ancho de 7 metros y un espesor constante de 5 centímetros (Tab.21)

TIPO DE CAPA	ESPESOR (cm)	TIPO DE MEZCLA	
		Denominación UNE-EN 13108-1(*)	Denominación anterior
RODADURA	4-5	AC16 surf D AC16 surf S	D12 S12
	> 5	AC22 surf D AC22 surf S	D20 S20
INTERMEDIA	5-10	AC22 bin D	D20
		AC22 bin S	S20
		AC32 bin S	S25
		AC 22 bin S MAM (**)	MAM(**)
BASE	7-15	AC32 base S	S25
		AC22 base G	G20
		AC32 base G	G25
		AC 22 base S MAM (***)	MAM(***)
ARCENES(****)	4-6	AC16 surf D	D12

(*) Se ha omitido en la denominación de la mezcla la indicación del tipo de ligante por no ser relevante a efectos de esta tabla.

(**) Espesor mínimo de seis centímetros (6 cm).

(***) Espesor máximo de trece centímetros (13 cm).

(****) En el caso de que no se emplee el mismo tipo de mezcla que en la capa de rodadura de la calzada.

Tabla 21 Tipo de mezcla a utilizar en función del tipo de capa y espesor.

4.2.3.2.2. Conservación y Mantenimiento

Después de haber establecido el diagnóstico sobre el estado de cada tramo homogéneo y el nivel de sus deterioros, se analizarán las soluciones de conservación posibles y se proyectará la más apropiada en cada caso. La renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse si se produce alguno de los supuestos siguientes:

- Cuando no sea necesaria una rehabilitación estructural, de acuerdo con lo indicado en esta norma, pero el estado superficial del pavimento presente deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario o a la durabilidad del pavimento. Las deficiencias son las siguientes:
 - Pavimento deslizante por pulimento o por falta de macrotextura.
 - Pavimento deformado longitudinal o transversalmente, con una regularidad superficial inadecuada.
 - Pavimento fisurado, descarnado o en proceso de desintegración superficial.
- Cuando existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial.
- Por razones de conservación preventiva.

Una vez establecida la necesidad de mantenimiento de un firme o pavimento de carretera, la determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las siguientes etapas en el caso más general:

- Recopilación y análisis de datos.
- Evaluación del estado del firme y de su nivel de agotamiento.
- Diagnóstico sobre el estado del firme.
- Análisis de soluciones y selección del tipo más apropiado.
- Proyecto de la solución adoptada.

En algunos casos, las etapas anteriores se podrán simultanear o simplificar, según sea la naturaleza de los deterioros del firme y la técnica que se vaya a utilizar. Se evaluará por medio de una inspección visual y de una auscultación. Aunque en realidad, la selección y el proyecto de la solución se individualizarán para cada uno de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme que se hayan determinado, basándose en la inspección visual y en la auscultación del firme y, en especial, en el estudio de las deflexiones. A las zonas singulares que pudieran existir dentro de cada tramo homogéneo se les aplicará la solución específica que les corresponda.

En acogimiento a la normativa vigente recogida en la orden FOM/3459/2003 (BOE) y tras consultar a la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Cantabria y la información extraída de Economic Evaluation of Long-Life Pavements (OECD), para el presente estudio se ha tenido a bien considerar, en primer lugar, que se realizará una única intervención al octavo año desde su construcción, esta hipótesis no es aleatoria sino que se ha hecho en base a la experiencia de técnicos de la Demarcación de Carreteras de Cantabria y a la edad media en la que se lleva a cabo en otros países del mundo. Así pues, el área afectada se calcula próxima al quince por ciento del total viario (15%).

Eliminación parcial y reposición del firme existente

Así, a los 8 años de la construcción de la carretera, se llevará a cabo una eliminación y retirada por medios mecánicos de los materiales que componen el firme hasta la profundidad precisa y su reposición con el mismo espesor de mezclas bituminosas. La eliminación parcial de las capas aglomeradas en firmes con pavimento bituminoso se realizará siempre mediante técnicas de fresado. Aunque en firmes muy flexibles con un espesor total de materiales bituminosos inferior a seis centímetros (6 cm), podría eventualmente considerarse el empleo de otros procedimientos.

La eliminación parcial y reposición alcanzarán a todas las zonas y capas del firme que presenten agotamiento estructural o vida residual insuficiente. Para la delimitación de la superficie y de la profundidad de esta solución se partirá de los valores de la deflexión patrón en los diferentes puntos de medida y de los resultados de una inspección visual detallada.

Se considerará que existe agotamiento estructural del firme cuando se observe en su superficie un agrietamiento de tipo estructural (zonas del carril cuarteadas en malla gruesa o fina y zonas de las rodadas con grietas longitudinales, ramificadas o no). En este caso, si no se conoce la profundidad del agrietamiento, se procederá a un reconocimiento más detallado del firme del carril mediante la extracción de testigos y la ejecución de calicatas escalonadas capa a capa. La eliminación parcial de firme y su posterior reposición deberá alcanzar la profundidad necesaria, o hasta la capa cuya superficie no presente agrietamiento estructural.

En este caso, entre las posibles soluciones de conservación y mantenimiento de firmes disponible para capas bituminosas, se ha optado por la siguiente solución: El fresado del área afectada del firme existente y reposición con mezcla bituminosa hasta la misma cota que la superficie original del pavimento existente. Una vez se ha realizado el fresado se aplica un riego de ligante que sirva para aumentar la adherencia entre el material que se encuentra debajo y la nueva mezcla. Inmediatamente después se extiende la mezcla y se compacta con una compactadora de rodillos y otra neumática.

4.2.3.2.3. Rehabilitación Superficial

La rehabilitación o renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse debido a causas muy similares a las de conservación y mantenimiento, extendidas a la totalidad del tramo.

- Cuando, realizada la tramificación según lo indicado en el apartado 6.1, existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial, pero estén comprendidos entre dos contiguos que sí la necesitan, podrá ser conveniente dar continuidad a la superficie de rodadura, por criterios de uniformidad funcional.
- Por razones de conservación preventiva, en ciertos casos convendrá aplicar el criterio anterior a tramos o grupos de tramos de longitud mayor, en los que, de acuerdo con esta norma, no sea estrictamente necesaria la rehabilitación (estructural o superficial), pero se prevea que lo vaya a ser a corto plazo.

Una vez establecida la necesidad de la rehabilitación superficial de un firme o pavimento de carretera, la determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las mismas etapas que en el proceso de conservación.

En algunos casos, las etapas anteriores se podrán simultanear o simplificar, según sea la

naturaleza de los deterioros del firme y la técnica de rehabilitación que se vaya a utilizar.

La fase de rehabilitación superficial se realizará al término de la vida útil de la capa en cuestión, que para este estudio ha sido estimada con la ayuda de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Cantabria y la información extraída de Economic Evaluation of Long-Life Pavements (OECD). La vida útil será de 12 años. Consistirá en la eliminación total mediante el fresado de la capa de rodadura, la fabricación de nueva mezcla bituminosa y su puesta en obra, incluyendo los procesos de extendido a través de la extendidora empleada en la fase de construcción y la compactación, siguiendo las mismas directrices que han servido para la construcción inicial de la pavimentación.

Se considera como fin de la vida útil, el momento en el que la pavimentación no sea en grado de garantizar las prestaciones de servicio.

4.3. ALCANCE DEL CICLO DE VIDA

4.3.1. Unidad funcional

Suponiendo que el comportamiento de las mezclas bituminosas semicalientes y mezclas bituminosas semicalientes con RAP cumplen, al menos, la misma gama de requisitos que la opción mezclas bituminosas en caliente convencional, la unidad funcional se define como una longitud específica del asfalto igual a 1 kilómetro (1 km).

En base a la normativa española vigente se ha tomado un ancho igual a siete metros (7 m), suma de las dos circulaciones (Artículo 2º. Dimensiones transversales de las carreteras y caminos. Instrucción de carreteras, 1939).

4.3.2. Límites del sistema

El establecimiento de los límites del sistema es esencial, pues determina cuáles serán las entradas y salidas del mismo. Este estudio queda limitado los procesos producción, transporte, puesta en obra, mantenimiento y reciclado de mezclas bituminosas, desde la extracción de la materia prima hasta el momento en el que el asfalto es depositado o reciclado. Las entradas al sistema serán las materias primas y energía necesaria para el tratamiento de los residuos y las salidas del mismo serán las emisiones al aire y la energía consumida.

Quedan fuera del estudio la infraestructura de las plantas, tanto de betún y áridos como la de mezcla asfáltica, el transporte interno en la planta, la fase de circulación de maquinaria desde garaje o establecimiento de alquiler hasta la obra.

Además, la fase de uso de la mezcla tampoco ha sido objeto de análisis, principalmente debido a la enorme dificultad que presenta a la hora de recabar datos fiables.

4.4. INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV)

El inventario es el proceso de recopilación de datos, que a través de cálculos y estimaciones permiten identificar y cuantificar las entradas y salidas: materiales y combustibles, energía y contaminantes, de cada uno de los procesos definidos dentro del alcance del sistema. Los datos fueron recogidos a partir de bases de datos fiables, literatura y estudios precedentes de ACV en

publicación. Cuando no se han encontrado a disposición datos específicos, se tomaron en cuenta datos de materiales o procesos similares.

4.5. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV)

Una vez que se dispone de los datos de inventario, se lleva a cabo la fase de Evaluación de Ciclo de Vida para poder calcular de esta manera los valores de los indicadores ambientales. El fin de esta etapa es evaluar los resultados del ICV del sistema de producto para comprender mejor su significado ambiental, utilizando indicadores ambientales que permitan condensar y explicar los resultados del ICV. Los indicadores utilizados en este trabajo han sido cinco, usados en los estudios de ACV específicos de pavimentaciones bituminosas y que más afectan al medio ambiente, según ha sido recogido en la literatura especializada:

- Calentamiento global (kg CO₂). El dióxido de carbono y otros gases que resultan de la quema de combustibles fósiles se acumulan en la atmósfera y provocan un aumento de la temperatura media de la tierra. También conocido como potencial de calentamiento global (GWP), la huella de carbono se mide en unidades equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e). Los científicos y los políticos, entre otros, consideran que el calentamiento global es el responsable de problemas como la desaparición de los glaciares, la extinción de especies, las temperaturas más extremas, entre otros.
- Acidificación del aire (kg SO₂). La combustión de combustibles genera óxido de azufre, óxido nitroso y otras emisiones ácidas al aire. Esto provoca un aumento del ácido en el agua de la lluvia, lo que ocasiona ácidos en los lagos y el suelo. Estos ácidos pueden convertir en tóxicos la tierra y el agua para las plantas y la vida acuática. La lluvia ácida también puede disolver materiales sintéticos, como el hormigón. Este impacto se suele medir en kg de equivalentes de dióxido de azufre (SO₂).
- Cantidad total de energía consumida (MJ). Esta es una medida de las fuentes de energía no renovables asociadas con el ciclo de vida de la pieza en mega julios (MJ). Este impacto no sólo incluye la electricidad o los combustibles utilizados durante el ciclo de vida del producto, sino también la corriente de energía necesaria para obtener y procesar estos combustibles, y la energía gris que se liberaría de los materiales en la fase de incineración. La cantidad total de energía consumida se expresa como valor calorífico neto de la demanda de energía de recursos no renovables (por ejemplo, petróleo, gas natural, etc.). Se tienen en cuenta también factores como las eficiencias en la conversión de la energía (por ejemplo, potencia, calor, vapor, etc.). Para el estudio se han tenido en cuenta varios tipos de energía, el consumo de diésel, electricidad, light fuel oil y fuel oil pesado.
- Eutrofización del agua, cuando se añade una cantidad excesiva de nutrientes a un ecosistema acuático, se produce la eutrofización. El nitrógeno y el fósforo procedentes de aguas residuales y fertilizantes agrícolas dan lugar al excesivo crecimiento de algas, que consumen el oxígeno del agua y provocan la muerte de las plantas y los animales del medio acuático. Este impacto se suele medir en kg de equivalentes óxidos de nitrógeno (NO_x).
- El monóxido de carbono (CO) es una sustancia que se genera fundamentalmente por la combustión incompleta existiendo un gran riesgo de inhalación que, en pequeñas

concentraciones, puede dar lugar a confusión mental, vértigo, dolor de cabeza, náuseas, debilidad y pérdida del conocimiento. Si se produce una exposición prolongada o continua, pueden verse afectados el sistema nervioso y el sistema cardiovascular, dando lugar a alteraciones neurológicas y cardíacas. En cuanto a su impacto en el medio ambiente, se trata de una sustancia extremadamente inflamable que reacciona vigorosamente con oxígeno, acetileno, cloro, flúor y óxidos nitrosos, pudiendo provocar humos tóxicos e incendios si existen focos de calentamiento. Es un precursor de ozono, es decir, al combinarse con otros contaminantes atmosféricos forma ozono troposférico (próximo a la superficie terrestre) que provoca quemaduras importantes en el ser humano y es dañino para la flora y fauna autóctona.

Aunque sólo se ha tenido en cuenta el mezclas bituminosas en caliente, mezclas bituminosas semicalientes y el mezclas bituminosas semicalientes + RAP como elementos singulares dentro del programa para el cálculo del ACV, en todo momento se han considerado en los procedimientos desarrollados que en las mezclas bituminosas semicalientes y mezclas bituminosas semicalientes con RAP se ha añadido cera, y material residual en el segundo, y que de este se ha aprovechado un porcentaje del betún residual.

5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

5.1. INTERPRETACIÓN DE CICLO DE VIDA

A continuación se presentarán los tres escenarios bajo estudio, caracterizados con los resultados obtenidos en cada caso para los diferentes indicadores tomados en consideración a lo largo del completo ciclo de vida.

5.1.1. Escenario MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

El grueso de la energía consumida durante el ciclo de vida de una mezcla semicliente se produce durante el proceso de fabricación de la mezcla (Fig. 43). En las fases de construcción y rehabilitación la energía consumida durante la fabricación de 121762,85 MJ, lo que supone casi el 42% del total del ciclo de vida.

El consumo de energía debido al transporte es significativamente mayor en la fase de rehabilitación. Entre el transporte a Obra y su disposición en la planta de reciclado asciende a 12050,2463 MJ, exactamente el doble de consumo que el transporte necesario para la construcción de la capa.

El consumo de los equipos es mucho menor, del orden del 1.6% en la fase de mayor consumo.

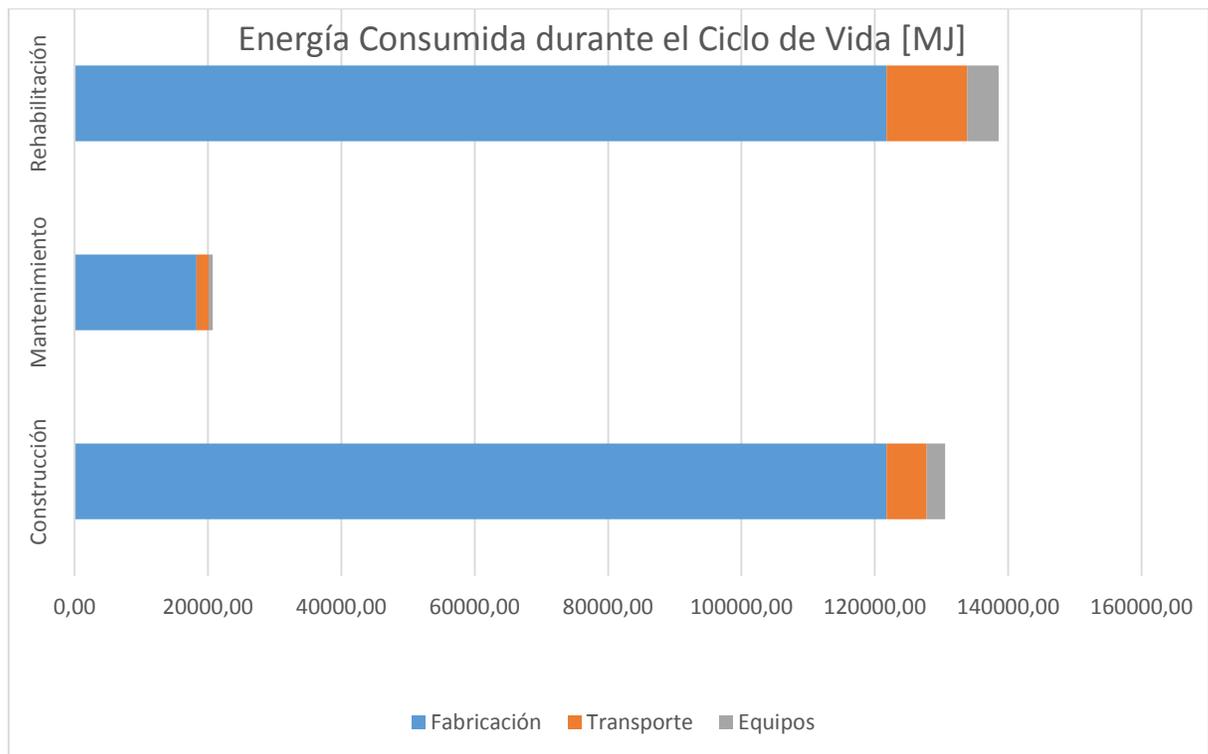


Fig. 43 Consumo de Energía.

En cambio, las emisiones de CO₂ y NO_x son infinitamente mayores durante el transporte. En la

fase de rehabilitación las emisiones de ambos gases duplican las emisiones producidas en la construcción. El mantenimiento es la fase de menos emisiones, es en esta fase donde menos material se emplea y consecuentemente las emisiones se reducen.

En la fase de rehabilitación las emisiones de CO₂ son del 52%. Otra vez, como en el consumo de energía, el trabajo de los equipos es el que menor impacto produce (Fig.44)

Las emisiones de NO_x son insignificantes para la fabricación y los equipos, la emisión de NO_x es en la fase de transporte casi del 90% (Fig.45).



Fig. 44 Emisiones de CO₂

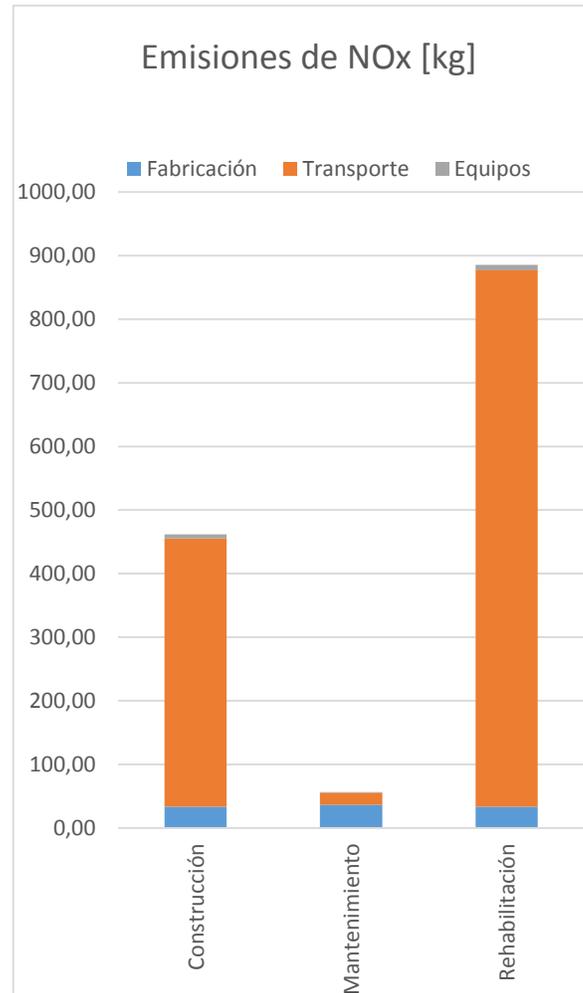


Fig. 45 Emisiones de NO_x.

El transporte genera casi el 70% de las emisiones de SO₂, la fase de mantenimiento apenas contribuye en cualquiera de sus etapas a las emisiones de este gas. La fase de construcción emite del orden del 50% menos de este gas. En su conjunto el SO₂ es el gas con menores emisiones, contabilizadas en kilogramos, de entre todos los recogidos en el estudio (Fig.46). En el caso del monóxido de carbono, se aprecia un cambio radical en los actores responsables del mayor porcentaje de emisiones. El proceso de fabricación de la mezcla emite el mayor porcentaje

de CO en todas las fases del ciclo de vida, desde la construcción hasta la rehabilitación. La fabricación de la mezcla en las fases de construcción y la reposición al final de su vida útil alcanzan los 1.940 kilogramos de gas a la atmósfera. El mantenimiento se estima entorno al 15% de la cifra anterior (Fig.47).

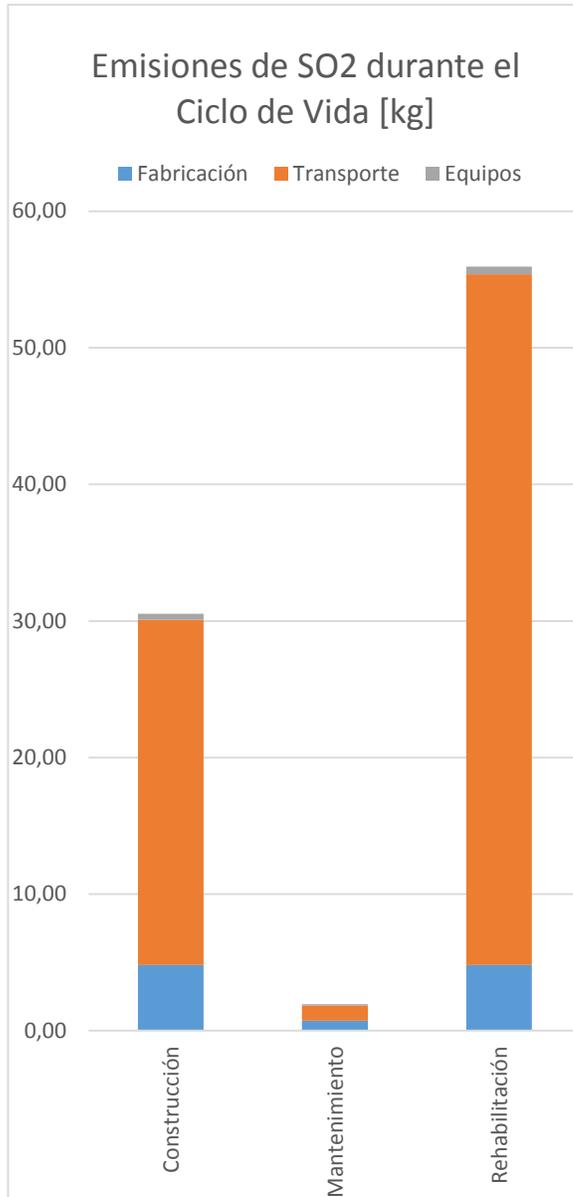


Fig. 46 Emisiones de SO2.

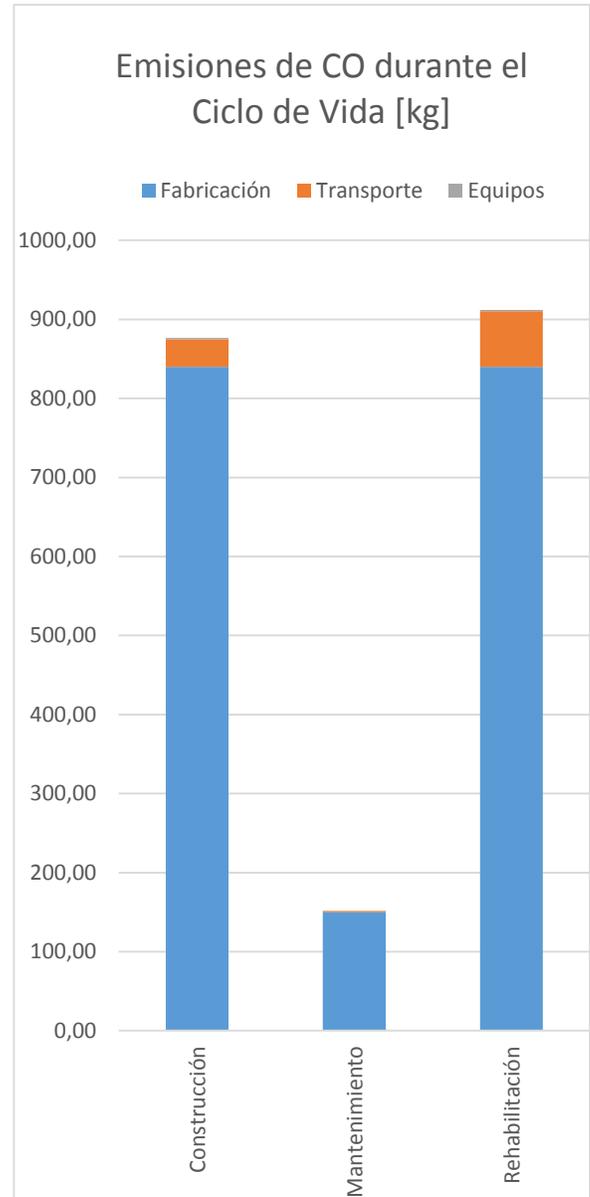


Fig. 47 Emisiones de CO.

A continuación se muestra un cuadro resumen con los resultados del estudio para el escenario de una mezcla bituminosa fabricada en caliente (Tab.22).

		Energía [MJ]	CO2 [Mg]	NOx [kg]	SO2 [kg]	CO [kg]
Construcción	Fabricación	121762,85	6851,67	33,68	4,80	840,01
	Transporte	6025,12	19671,14	421,52	25,29	35,13
	Equipos	2768,77	207,20	6,40	0,42	1,38
Mantenimiento	Fabricación	18264,43	1126,86	36,35	0,72	149,76
	Transporte	1807,54	885,20	18,97	1,14	1,58
	Equipos	629,26	47,09	1,17	0,08	0,25
Rehabilitación	Fabricación	121762,85	6851,67	33,68	4,80	840,01
	Transporte	12050,24	39342,28	843,04	50,57	70,25
	Equipos	4738,28	354,58	8,58	0,56	1,84
TOTAL		2,90E+05	7,53E+04	1,40E+03	8,84E+01	1,94E+03

Tabla 22 Cuadro resumen.

5.1.2. Escenario MEZCLAS SEMICALIENTES

A continuación, pasamos a analizar los resultados obtenidos para una mezcla bituminosa semicaliente fabricada a través de la adición de una cera.

El consumo de energías en este segundo escenario presenta grandes similitudes con el de una mezcla bituminosa en caliente. Las fases de construcción y rehabilitación son de nuevo las mayores consumidoras de energía. Además, la etapa de fabricación es, en todas las fases, donde más energía se ha consumido durante la vida de la mezcla (Fig.48).

El mantenimiento supone la sexta parte del consumo recogido en la fase de rehabilitación. En total esta fase consume casi 4.000 MJ, ridículos frente a los 120.000 Mj de la fase de rehabilitación.

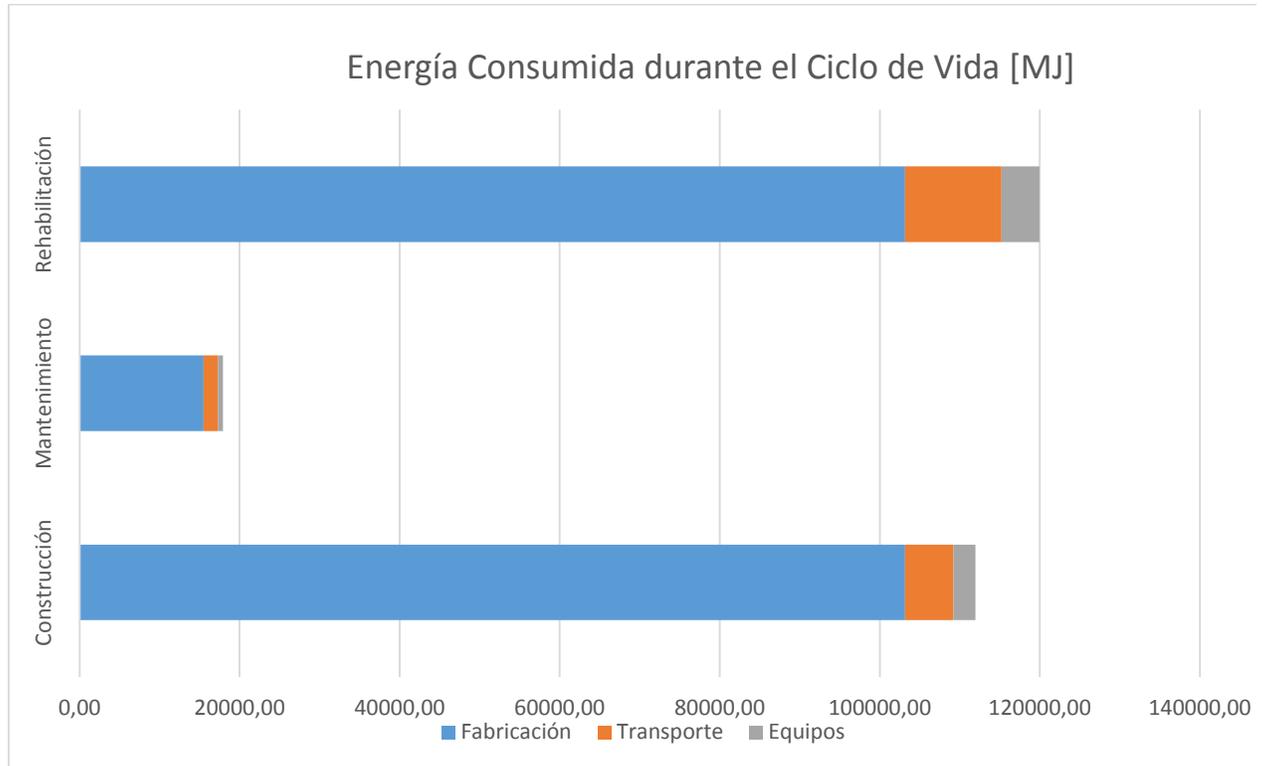


Fig. 48 Consumo de energía.

Las emisiones de CO₂ y NO_x continúan en la línea de las del primer escenario. Mayores durante el transporte. En la fase de rehabilitación las emisiones de ambos gases doblan a las emisiones generadas durante la construcción.

El mantenimiento, con menor volumen de material, sigue siendo la fase que menos emite a la atmósfera, en esta fase se trabaja con un 15% de material, aunque también se realiza el transporte del material fresaado a la planta de reciclado. Es evidente que a menos material, consecuentemente menores serán las emisiones.

En la fase de rehabilitación las emisiones de CO₂ rondan el 50%. De nuevo, el trabajo de los equipos es el que menor impacto produce (Fig.50)

Las emisiones de NO_x son insignificantes para la fabricación y los equipos, la emisión de NO_x es en la fase de transporte casi del 85% (Fig.49)

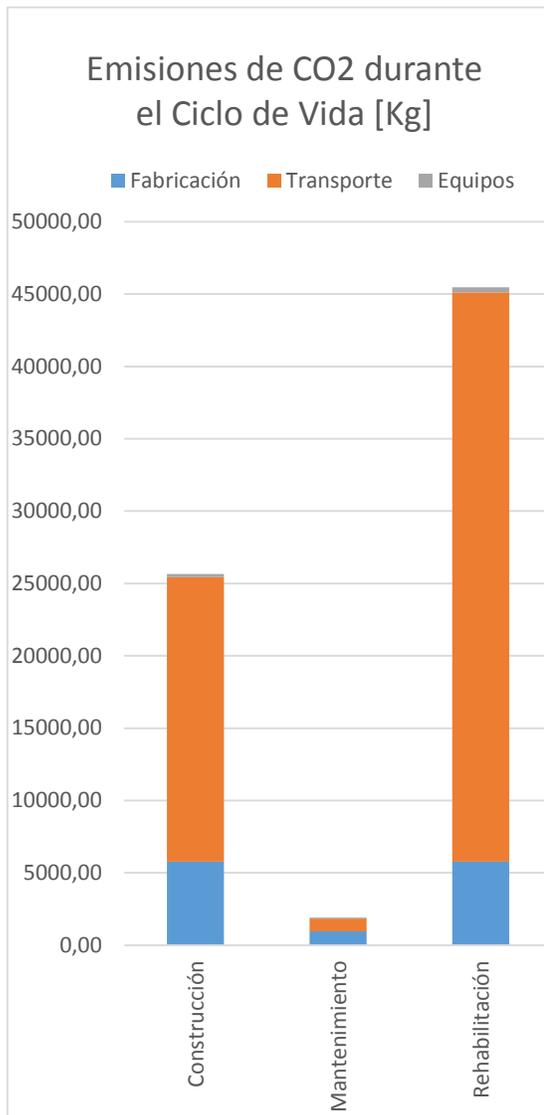


Fig. 49 Emisiones de CO2.

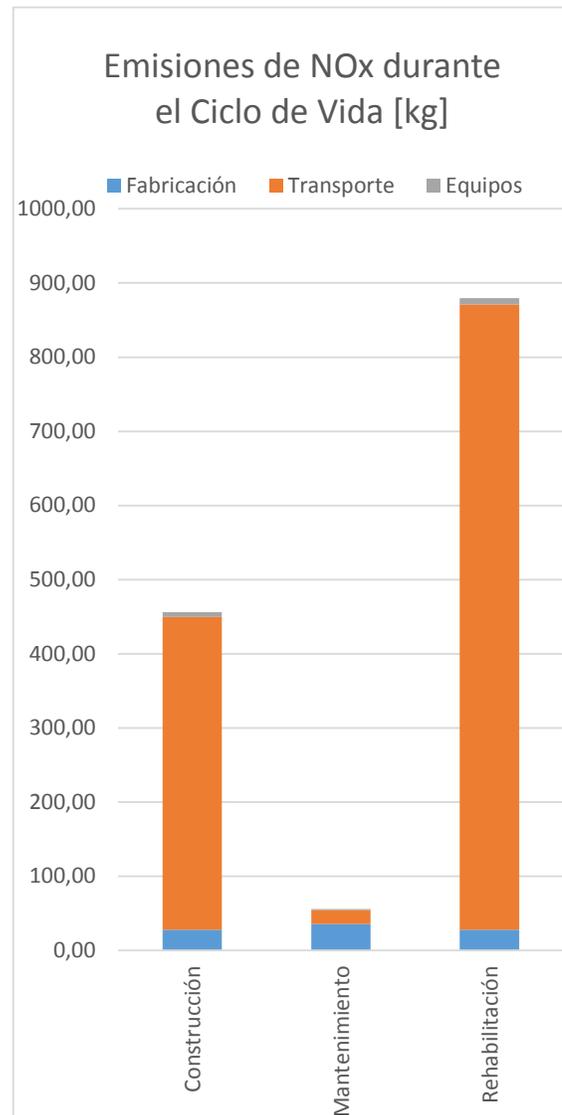


Fig. 50 Emisiones de NOx.

El transporte total genera casi 77,01 kilogramos de emisiones de SO2, la fase de mantenimiento apenas contribuye en cualquiera de sus etapas a las emisiones de este gas. La fase de construcción emite del orden del 50% menos que la fase de rehabilitación. El SO2 es el gas con menores emisiones también dentro de este escenario, contabilizadas en kilogramos, de entre todos los seleccionados para el análisis del ciclo de vida (Fig.51).

En el caso del monóxido de carbono, se aprecia un cambio radical en los actores responsables del mayor porcentaje de emisiones. El proceso de fabricación de la mezcla emite el mayor porcentaje de CO en todas las fases del ciclo de vida, desde la construcción hasta la rehabilitación. La fabricación de la mezcla en las fases de construcción y la reposición al final de su vida útil alcanzan los 1.940 kilogramos de gas a la atmósfera. El mantenimiento se estima

entorno al 15% de la cifra anterior (Fig.52).

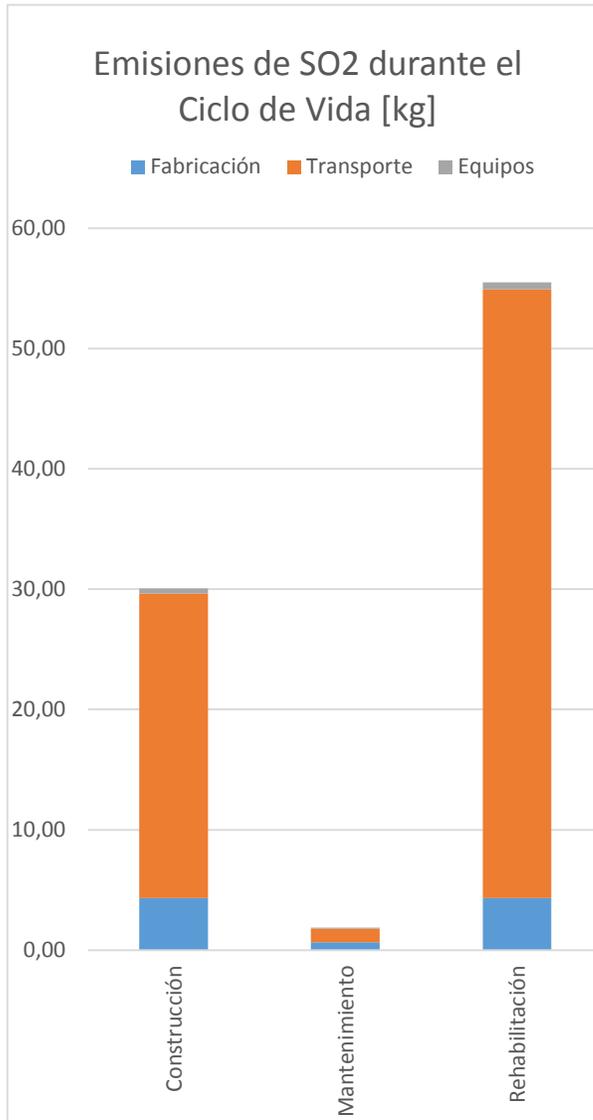


Fig. 51 Emisiones de SO2.

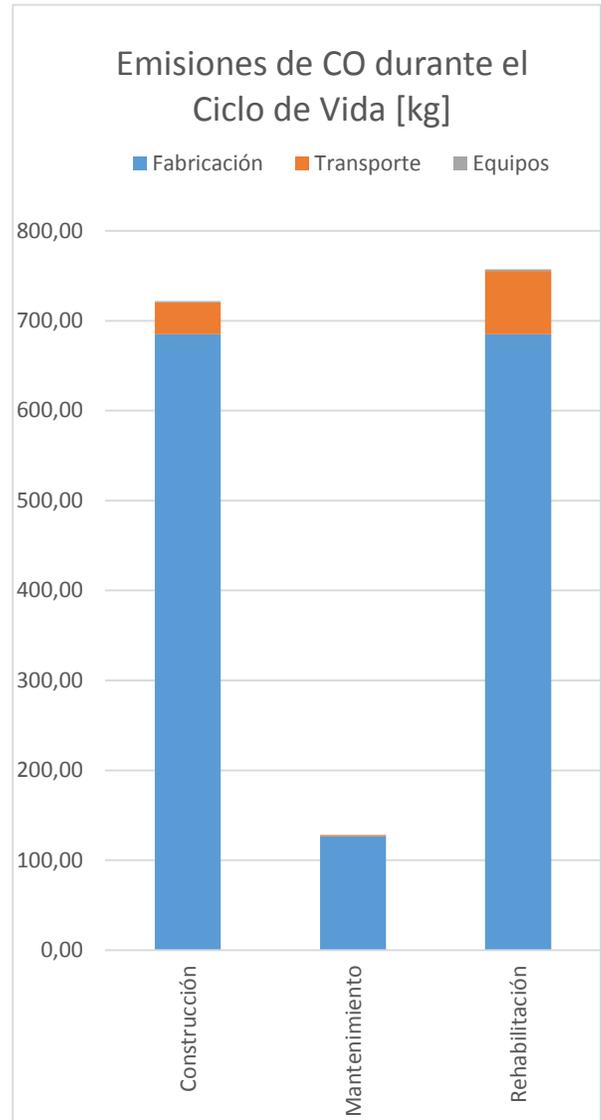


Fig. 52 Emisiones de CO.

En la tabla 22 se recogen todos los resultados arrojados por la hoja de cálculo con la que se han realizado todos los estudios del ciclo de vida. La tabla muestra, para cada indicador, el resultado en las tres etapas para las fases de construcción, mantenimiento y rehabilitación.

		Energía [MJ]	CO2 [Mg]	NOx [kg]	SO2 [kg]	CO [kg]
Construcción	Fabricación	103172,37	5767,79	28,10	4,34	685,17
	Transporte	6025,12	19671,14	421,52	25,29	35,13
	Equipos	2768,77	207,20	6,40	0,42	1,38
Mantenimiento	Fabricación	15475,86	964,28	35,51	0,65	126,53
	Transporte	1807,54	885,20	18,97	1,14	1,58
	Equipos	629,26	47,09	1,17	0,08	0,25
Rehabilitación	Fabricación	103172,37	5767,79	28,10	4,34	685,17
	Transporte	12050,2463	39342,2868	843,0490018	50,5829401	70,2540835
	Equipos	4738,28543	354,587899	8,583267381	0,5673375	1,84842219
TOTAL		2,50E+05	7,30E+04	1,39E+03	8,74E+01	1,61E+03

Tabla 23 Cuadro resumen.

5.1.3. Escenario MEZCLAS SEMICALIENTES + RAP

Este escenario incorpora material reciclado a una mezcla bituminosa semicaliente. Los resultados obtenidos en el análisis del ciclo de vida para esta mezcla serán presentados a continuación. Las fases que han demostrado generar un mayor impacto han sido la construcción y la rehabilitación. El aporte a las emisiones y consumo de energía de la fase de mantenimiento son tan pequeñas que no suponen un resultado relevante para este estudio.

Dentro de cada una de las fases los resultados han sido desglosados en tres etapas: la fabricación, el transporte y los equipos empleados. Tras el análisis de los resultados es posible afirmar que los equipos apenas generan un impacto significativo, llegando incluso a poder quedar excluidos, en posteriores estudios. Sin embargo, el transporte del material y la fabricación de la mezcla asfáltica suponen dos grandes focos de consumo de energía y emisión de gases. Por lo tanto cabría destacar la importancia de un estudio pormenorizado de estas etapas, midiendo para cada indicador los valores que durante ellas se generan.

El consumo de energía en la fase de mantenimiento supone una catorceava parte del consumo total. Mucho mayores, que la anterior, son las fases de construcción y rehabilitación, con consumos de 114.066 MJ y 122.061 MJ respectivamente. Entre ambas suman cerca del 95% del total (Fig.53).

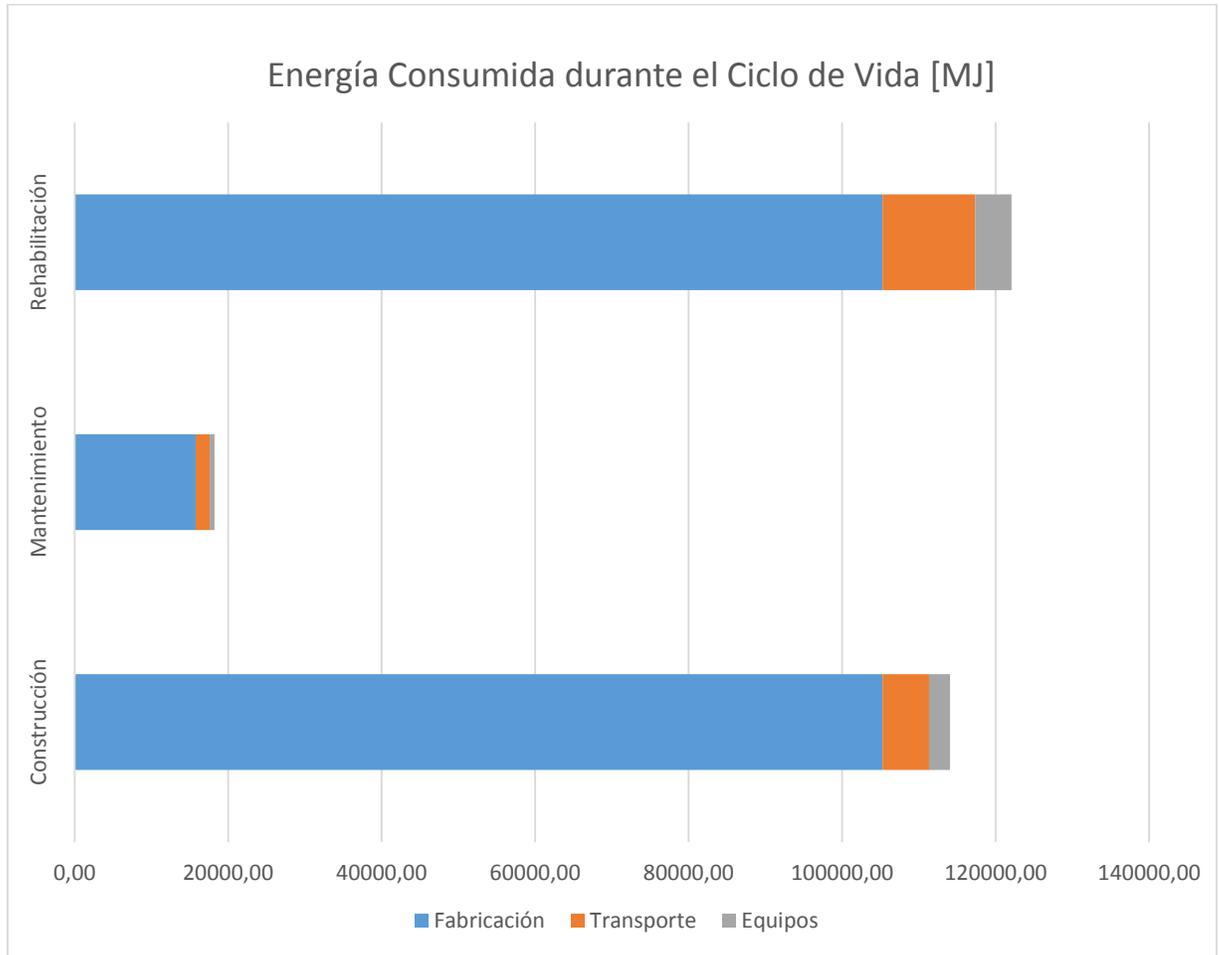


Fig. 53 Energía consumida.

El transporte del material genera el grueso de las emisiones de CO₂ y NO_x, que prácticamente inexistente para los equipos y muy bajo en la fase de fabricación de la mezcla asfáltica. En la fase de rehabilitación las emisiones de ambos gases doblan a las emisiones generadas durante la construcción, como ha venido ocurriendo en los escenarios anteriores.

El mantenimiento, con menor volumen de material, sigue siendo la fase que menos emite a la atmósfera, en esta fase se trabaja con un 15% de material, aunque también se realiza el transporte del material fresado a la planta de reciclado. Es evidente que a menos material, consecuentemente menores serán las emisiones. Las emisiones de CO₂ en esta fase son de 1.914 kilogramos. El resultado de NO_x es de 56 kilogramos. En la fase de rehabilitación las emisiones de CO₂ son 50% del total. De nuevo, el trabajo de los equipos es el que menor impacto produce (Fig.54)

Las emisiones de NO_x son insignificantes para la fabricación y los equipos, la emisión de NO_x es en la fase de transporte la más importante (Fig.55). En la fase de construcción se generan cerca de 60 kilogramos de SO₂. La fabricación y los equipos aportan tan solo 4.5 kilos, frente a los casi 25.5 kilogramos emitidos durante el transporte. El SO₂ continúa siendo el gas con menores emisiones también dentro de este escenario, contabilizadas en kilogramos, de entre todos los seleccionados para el análisis del ciclo de vida (Fig.56).

El monóxido de carbono se emite sobre manera durante la fabricación de la mezcla, 720 kilos en la fase de construcción, 131,76 kilos durante el mantenimiento. Los equipos emiten valores que en ningún caso sobrepasan los 2 kilogramos por fase. En total son 1.682,2 kilogramos de monóxido de carbonos los emitidos a la atmósfera durante el ciclo de vida de la cuna a la tumba (Fig.55).

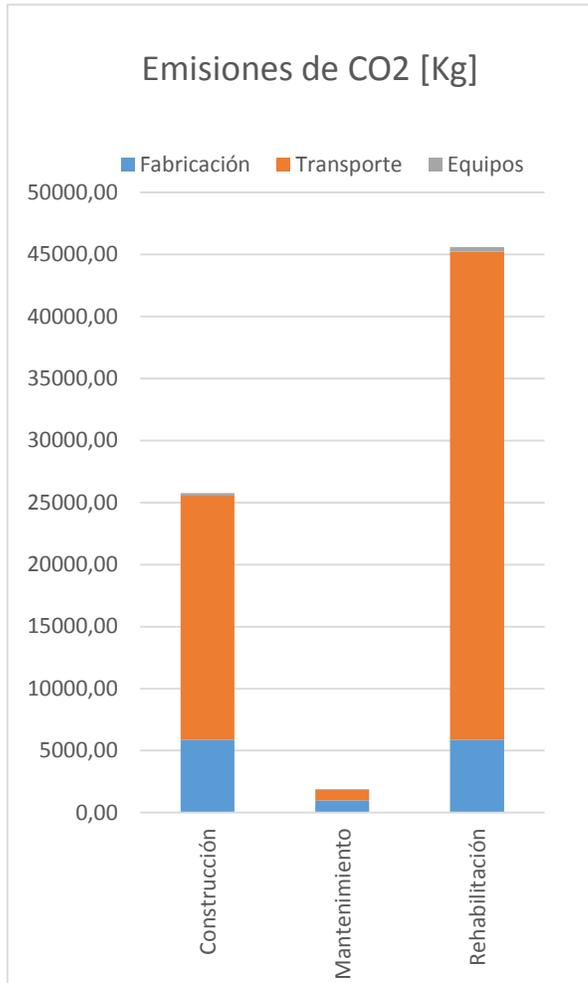


Fig. 54 Emisiones de CO2.

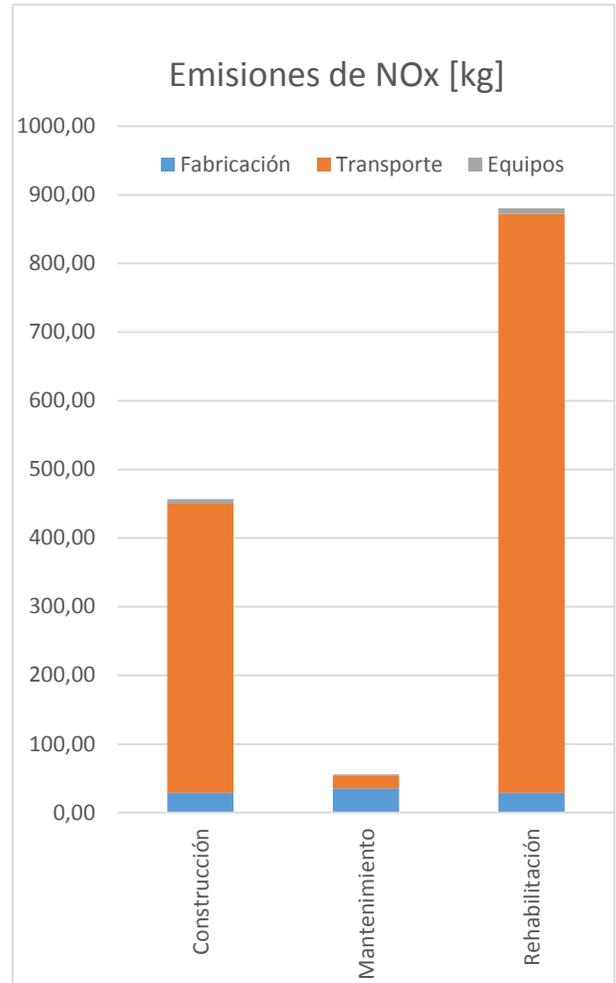


Fig. 55 Emisiones de NOx.

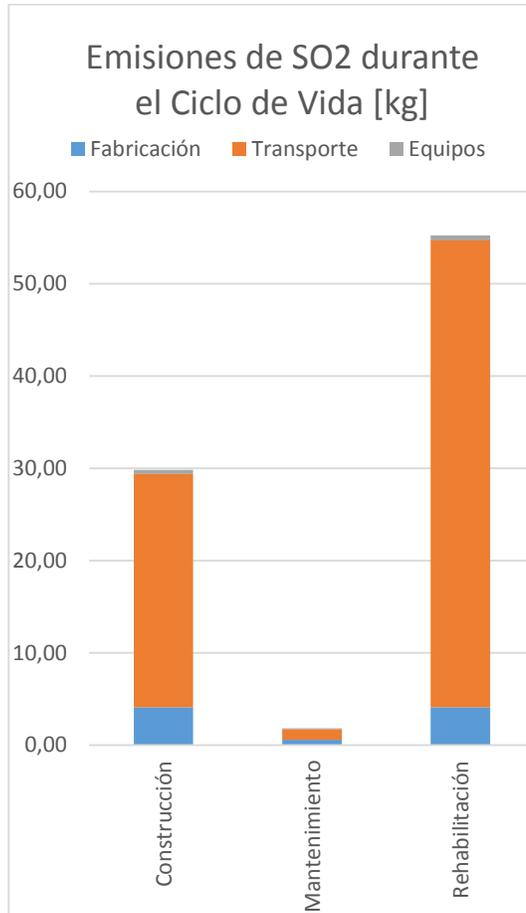


Fig. 56 Emisiones de SO2.

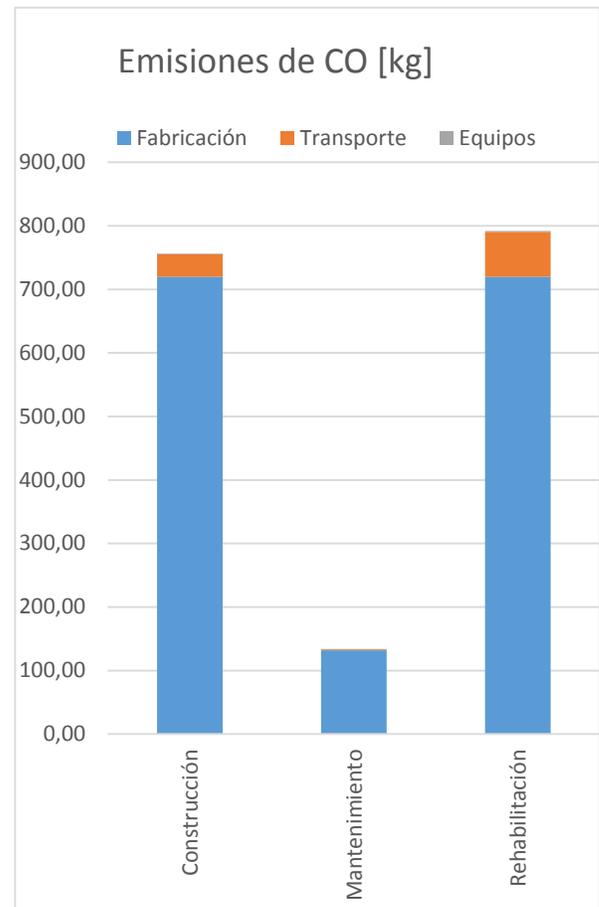


Fig. 57 Emisiones de CO.

La tabla 24 sintetiza los resultados de ACV para el tercer escenario.

		Energía [MJ]	CO2 [Mg]	NOx [kg]	SO2 [kg]	CO [kg]
Construcción	Fabricación	105272,62	5883,92	28,92	4,10	720,01
	Transporte	6025,12	19671,14	421,52	25,29	35,13
	Equipos	2768,77	207,20	6,40	0,42	1,38
Mantenimiento	Fabricación	15790,89	981,70	35,64	0,62	131,76
	Transporte	1807,54	885,20	18,97	1,14	1,58
	Equipos	629,26	47,09	1,17	0,08	0,25
Rehabilitación	Fabricación	105272,62	5883,92	28,92	4,10	720,01
	Transporte	12050,24	39342,28	843,04	50,58	70,25
	Equipos	4738,28	354,58	8,58	0,56	1,84
TOTAL		2,54E+05	7,33E+04	1,39E+03	1,15E+02	1,68E+03

Tabla 24 Cuadro resumen.

5.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

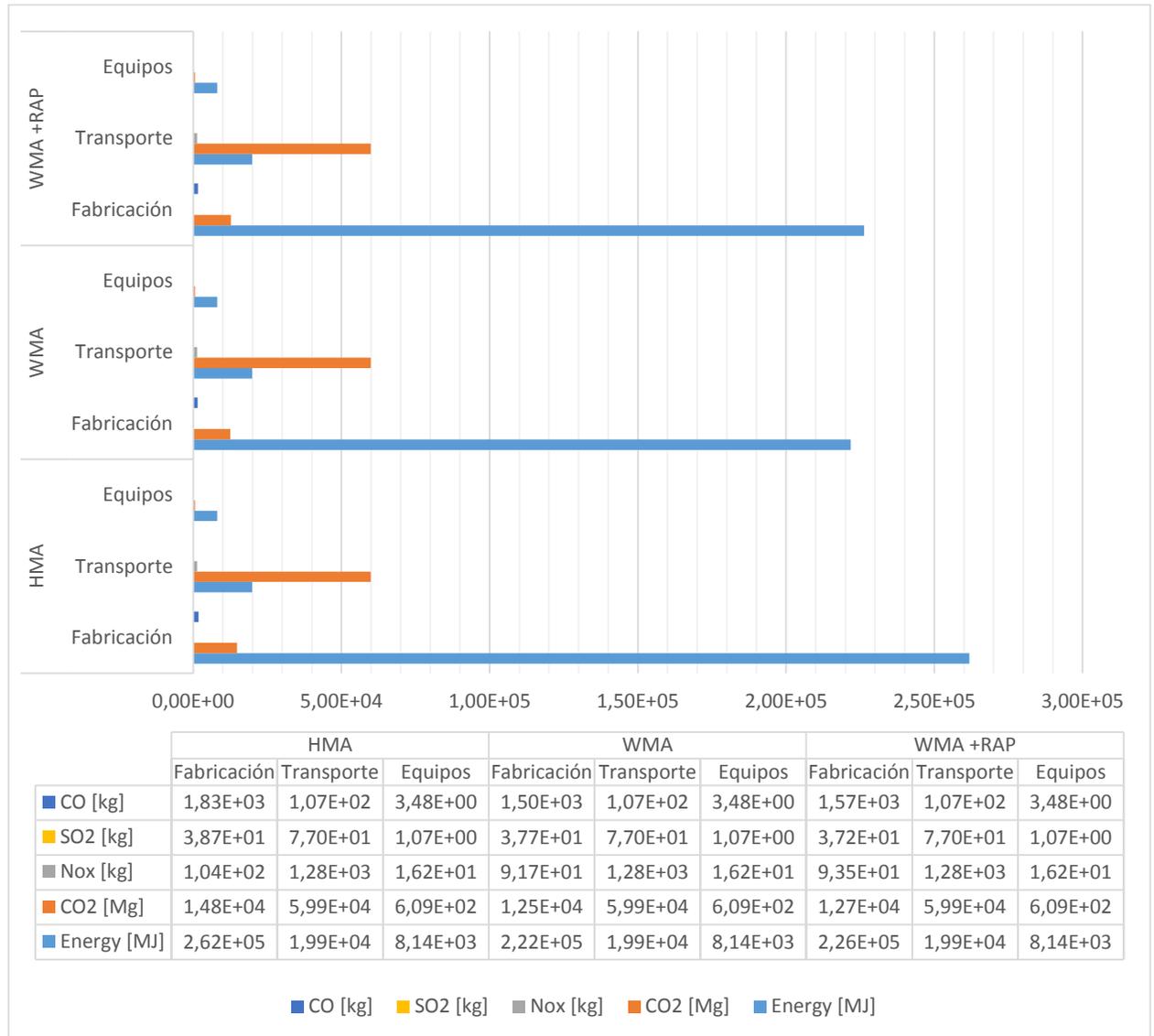


Fig. 58 Resumen de la comparación.

El consumo de energía muestra claras diferencias en el comportamiento medioambiental de las tres mezclas. El mayor consumidor de energía es el primer escenario, el de una mezcla bituminosa fabricada en caliente. Siguiendo a la mezcla en caliente viene la mezcla semicaliente con RAP, con una reducción de 45.000MJ. La mezcla semicaliente fabricada con el 100% de árido virgen es la que menos energía ha consumido, pero las diferencias con la mezcla semicaliente más RAP son pequeñas. El resultado que muestra la figura 59 es el total de todas las energías consideradas, como consumo eléctrico y de diésel. Entre la de mayor consumo y la más eficiente existe una reducción de más del 13%.

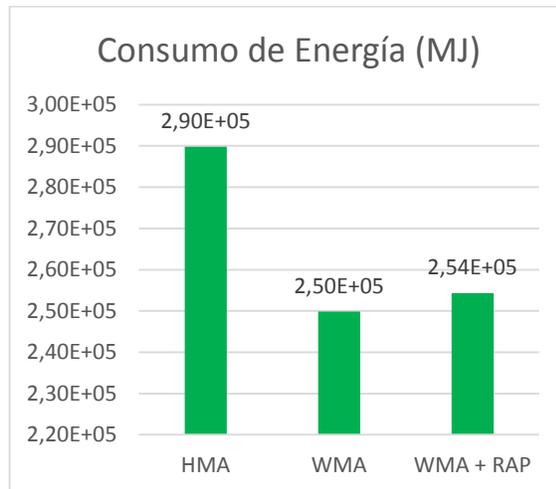


Fig. 59 Consumo de energía por escenario.

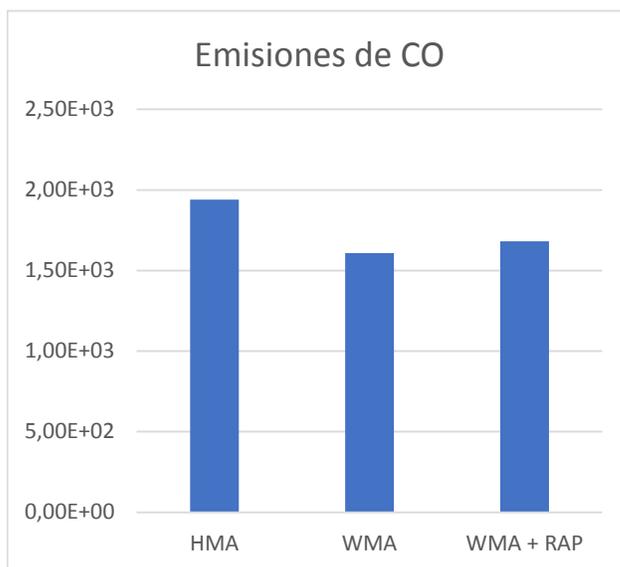


Fig. 60 Emisiones de CO por escenario.

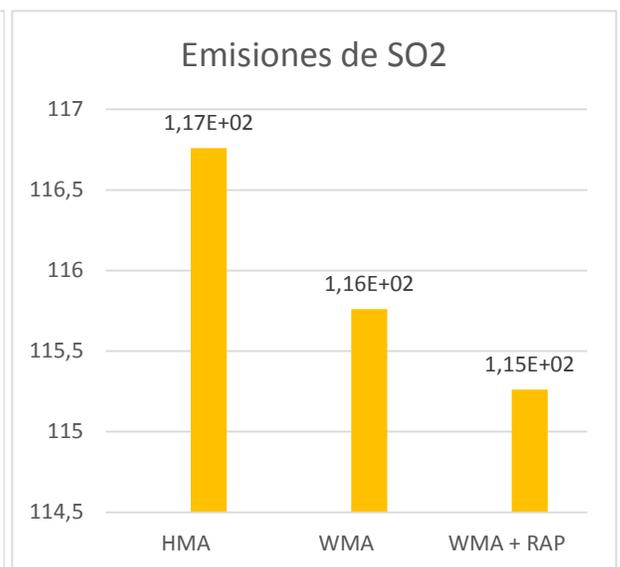


Fig. 61 Emisiones de SO2 por escenario.

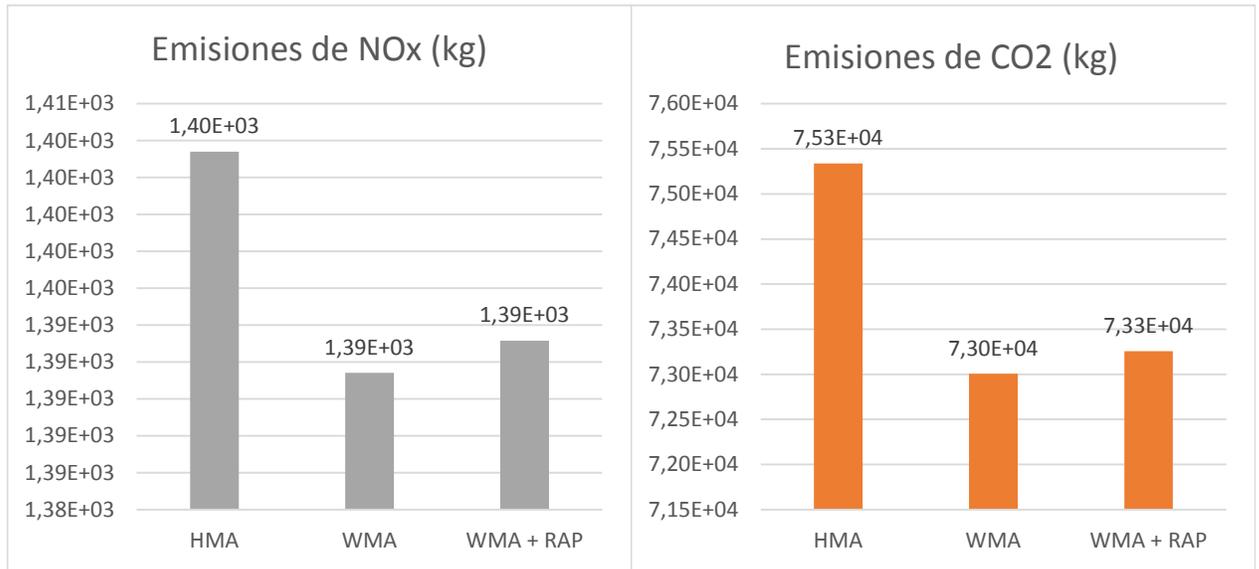


Fig. 62 Emisiones de NOx por escenario.

Fig. 63 Emisiones de CO2 por escenario.

Las emisiones de CO₂, NO_x y CO presentan un comportamiento similar. Dejando al margen el valor numérico de los resultados de las emisiones podemos apreciar como la mezcla fabricada en caliente produce una mayor cantidad de emisiones de los tres gases al aire (Fig.60, 62, 63).

La mezcla con RAP sigue en cantidad de gas emitido a las fabricadas en caliente, con una reducción notable en el caso de los tres gases alcanzando reducciones de hasta el 4%. La diferencia es mucho menor entre las mezclas semicalientes, con y sin RAP.

Las emisiones de SO₂ son menores en el caso de la mezcla bituminosa semicaliente con RAP, la gráfica en escalera hace notar el crecimiento casi lineal.

En el valor de las emisiones de monóxido de carbono se produce una reducción de entorno al 20%. La mayor reducción de SO₂ es de casi el 2%. La reducción máxima de NO_x es del 0.7% y la de CO₂ es del 3.05%.

TOTALES						
Escenario	Fase	Energía [MJ]	CO2 [Mg]	NOx [kg]	SO2 [kg]	CO [kg]
HMA	Fabricación	2,62E+05	1,48E+04	1,04E+02	3,87E+01	1,83E+03
	Transporte	1,99E+04	5,99E+04	1,28E+03	7,70E+01	1,07E+02
	Equipos	8,14E+03	6,09E+02	1,62E+01	1,07E+00	3,48E+00
WMA	Fabricación	2,22E+05	1,25E+04	9,17E+01	3,77E+01	1,50E+03
	Transporte	1,99E+04	5,99E+04	1,28E+03	7,70E+01	1,07E+02
	Equipos	8,14E+03	6,09E+02	1,62E+01	1,07E+00	3,48E+00
WMA +RAP	Fabricación	2,26E+05	1,27E+04	9,35E+01	3,72E+01	1,57E+03
	Transporte	1,99E+04	5,99E+04	1,28E+03	7,70E+01	1,07E+02
	Equipos	8,14E+03	6,09E+02	1,62E+01	1,07E+00	3,48E+00

Tabla 25 Cuadro general de resultados.

TOTALES					
Escenario	Energía [MJ]	CO2 [Mg]	NOx [kg]	SO2 [kg]	CO [kg]
HMA	2,90E+05	7,53E+04	1,40E+03	1,17E+02	1,94E+03
WMA	2,50E+05	7,30E+04	1,39E+03	1,16E+02	1,61E+03
WMA + RAP	2,54E+05	7,33E+04	1,39E+03	1,15E+02	1,68E+03

Tabla 26 Resumen agregado de los escenarios.

6. CONCLUSIONES

Existe una gran variedad de posibilidades para el empleo a temperaturas más bajas de mezclas asfálticas, además de las convencionales de las mezclas en caliente. Elegir una u otra dependerá de los medios con que cuenten las empresas encargadas, del tipo de carretera, de los materiales de la zona y de las experiencias, etc.

- Podemos encontrar procedimientos para trabajar por encima de los 100°C, los denominados semicalientes.
- Los analizados en este ACV presentan ventajas medioambientales, debido a la reducción de las emisiones de gases y del consumo energético, así como ventajas en cuanto a la seguridad de las personas.
- La experiencia en España con mezclas semicalientes en donde el ligante utilizado ha sido un betún aditivado con ceras o con aditivos químicos ha sido muy positiva. Los estudios de control realizados a testigos de obra han dado valores similares a las mezclas fabricadas con betunes convencionales e incluso superiores (capacidad de deformación) en el caso de las ceras.
- Las obras realizadas con reciclados, en planta de caliente, con tasas del 100% de fresado se están comportando muy bien después de varios años. Se deberá observar su comportamiento en los próximos años.
- Será labor de las diferentes Administraciones de carreteras intentar dirigir hacia estas tecnologías, respetuosas con el Medio Ambiente, los futuros proyectos definiendo los criterios para cada tipo y cuantificando los ahorros energéticos y de emisiones según las técnicas.
- Por otra parte los investigadores deberán mejorar lo que tenemos hasta ahora tanto en técnicas como en productos para lograr que en un futuro cercano lo convencional sea utilizar estos métodos.
- El uso de un material reciclado como RAP puede reducir la cantidad de árido virgen y la energía necesaria para producir este árido (aunque no se han encontrado datos para este estudio, lo sostienen ACV revisados para este estudio).
- En términos de cualidades para su uso en ingeniería, Las mezclas bituminosas semicalientes pueden incorporar RAP.
- Sin embargo, Las mezclas bituminosas semicalientes y RAP pueden causar problemas de rendimiento con respecto a la humedad, frente a deformaciones permanentes, y resistencia a la fractura entre otros. Por lo tanto, estos materiales sostenibles deben ser adecuadamente comprendidos y posiblemente utilizados en combinación para equilibrar la triple línea de base como se requiere en un sistema sostenible.

7. BIBLIOGRAFÍA

- UNE-EN-ISO 14040, 2006. Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida -Principios y marco de referencia.
- UNE-EN-ISO 14044, 2006. Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida -Requisitos y directrices.
- Torre, N., 2010. Análisis de ciclo de vida (ACV) y estudio económico de una planta de incineración de residuos urbanos (RSU). Trabajo Fin de Grado, Graduado en ingeniería en tecnologías industriales. Universidad de Cantabria.
- Soto, E., 2009. Evaluación de la sostenibilidad ambiental del tratamiento de efluentes industriales fluorados. Trabajo Fin de Carrera, Ingeniero Químico. Universidad de Cantabria.
- Franke, M., Hindle, P., White, P.R., et al, 1995. Integrated solid waste management: a life cycle inventory. Ed. Blackie Academic & Professional.
- Clemente, G., 2005. Análisis de Ciclo de Vida: Aspectos metodológicos y casos prácticos. Ed. Universidad Politécnica de Valencia.
- Fullana, P., Puig, R., 1997. Análisis de Ciclo de Vida. Ed. Rubes.
- Chacón, J.R., 2008. Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). Escuela Colombiana de Ingeniería, Volumen 72, pp.37-70.
- Azapagic, A., 1999. Life Cycle Assessment and its applications to process selection, design and optimization. Chemical Engineering Journal, Volumen 73 (1), pp, 1-21.
- Moulthrop JS, McDaniel R, McGennis R, Mohammad L, Kluttz RO. Asphalt mixture innovations: state of the practice and vision for 2020 and beyond. TR News 2007; 253:20–3.
- EAPA. The use of warm mix asphalt – EAPA position paper. Brussels, Belgium: EAPA; 2010.
- Rubio MC, Martínez G, Baena L, Moreno F. Warm mix asphalt: an overview. Journal of Cleaner Production 2012; 24:76–84.
- Vaitkus A, Vorobjovas V, Ziliut L. The research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures. Vilnius, Lithuania: Road Department, Vilnius Gediminas Technical University; 2009
- Birgisdottir, H. (2005). Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration, PhD thesis, Institute of environment & Resources, Technical University of Denmark, Kgs Lyngby, Denmark.
- Birgisdottir, H., Bahnder, G., Hauschild, M.Z. & Christensen, T.H. (2007). Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: Recycling of bottom ash in road construction or landfilling in Denmark evaluated in the ROAD- RES model, Waste Management 27, S75–S84.
- ECRPD (2009). WP6 – Life cycles evaluation, Intelligent Energy Europe, Nov 2009, www.roadtechnology.se/ecrpd.eu/
- ECRPD (2010). Energy conservation in road pavement design, maintenance and utilisation, Intelligent Energy
- Europe, Feb 2010, www.roadtechnology.se/ecrpd.eu/
- Eurobitume (2011). Life cycle inventory: Bitumen, European Bitumen Association, D/2011/7512/17.
- Häkkinen, T. & Mäkele, K. (1998). Environmental adaptation of concrete – Environmental

- impact of concrete and asphalt pavements, VTT Research notes 1752.
- ISO (2006a). Environmental management – Life cycle assessment – Principals and framework, International organization for standardization, ISO 14040:2006(E).
 - ISO (2006b). Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, International organization for standardization, ISO 14044:2006(E).
 - Hoang, T., Jullien, A. & Ventura, A. (2005a). A global methodology for sustainable road – Application to the environmental assessment of French highway, 10DBMC International Conference of Building Materials and Components, Lyon, 17–20 April, 2005.
 - Josa, A., Aguado, A., Heino, A., Byars, E. & Cardim, A. (2004). Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1313–1320.
 - Josa, A., Aguado, A., Cardim, A. & Byars, E. (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU, Cement and Concrete Research 37 (2007) 781–788.
 - Mroueh, U-M, Eskola, P. & Laine-Ylijoki, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction, Waste Management 21 (2001) 271–277.
 - Olsson, S., Kärrman, E. & Gustafsson,
 - RE-ROAD (2011) re-road.fehrl.org/
 - Santero, N., Masanet, E. & Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review, Resources, Conservation and Recycling, Article in press.
 - Stripple, H. (2001). Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis, IVL, Swedish Environmental, Research Institute, 2001.
 - Sayagh, S., Venturaa, A., Hoanga, T., Franc, D. & Jullien, A. (2010). Sensitivity of the ACV allocation procedure for BFS recycled into pavement structures, Resources, Conservation and Recycling, 54 (2010) 348–358.
 - Instrucción de carreteras (1939). Artículo 2º. Dimensiones transversales de las carreteras y caminos.
 - Annelie Carlson (2011). Life cycle assessment of roads and pavements; Studies made in Europe VTI rapport 736ª.
 - www.cepsa.com/cepsa/Que_ofrecemos/Asfaltos/
 - Charlotte Milachowski, thorsten stengel and Christoph gehen. Life-cycle assessment for a road construction and use, Europave (2000) 9.
 - ORDEN FOM/3459/2003, (BOE de 12 de diciembre de 2003)

Anexo I.

INVENTARIO

MATERIAL	DENSIDAD (ton/m3)	Espesor(m)	Fuente
HMA	1,106		PaLATE (University of Berkeley)
Riego	0,64	0,01	PaLATE (University of Berkeley)

Producción de Mezcla asfáltica						
Mezcla	Energy [MJ/ton]	CO2 [kg/ton]	Nox [kg/ton]	SO2 [kg/ton]	CO [kg/ton]	Fuente
HMA	314,5514	17,7	0,087	0,0124	2,17	LCA of HMA and zeolite-based WMA with RAP
WMA	266,5264	14,9	0,0726	0,0112	1,77	LCA of HMA and zeolite-based WMA with RAP
WMA+ RAP	271,952	15,2	0,0747	0,0106	1,86	LCA of HMA and zeolite-based WMA with RAP

Mezcla	Diésel [MJ/ton]	Electricidad (MJ/ton)	Light fuel oil (MJ/ton)	Heavy fuel oil (MJ/ton)	Total (Mj/ton)	Fuente
HMA	5,18	11,808	259,675	37,8884	314,5514	LCA of HMA and zeolite-based WMA with RAP
WMA	5,18	11,808	211,65	37,8884	266,5264	LCA of HMA and zeolite-based WMA with RAP

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Análisis del ciclo de vida de Mezclas Bituminosas Semicalientes con árido reciclado

WMA+RAP	5,18	11,808	222,7	32,264	271,952	LCA of HMA and zeolite-based WMA with RAP
---------	------	--------	-------	--------	---------	---

Tipo de Transporte	Capacidad [Ton]	Consumo [L/km]	Fuente
Dump truck (bañera)	20	0,420	PaLATE

Equipos y maquinas							
Tipo de operación	Equipo	Marca / Modelo	Motor [hp]	Productividad [ton/h]	Combustible	Consumo [l/h]	Fuente
Asphalt Paving & Replace Paving	Paver	Dynapac F2500C (2)	150	650	Diesel	49,10	www.dynapac.com
	Pneumatic roller	Dynapac CP132	100	668	Diesel	26,10	PaLATE
	Tandem roller	Ingersoll DD90HF	130	325	Diesel	27,60	www.volvocoe.com
Milling	Milling machine	Wirtgen 2200	875	1100	Diesel	156,20	PaLATE

Equipos y Máquinas						
Emissiones	NOx	Fuente	SO2	Fuente	CO	Fuente
kg/hp-hr	0,01407	USEPA AP-42 Section 3.3	0,00093	USEPA AP-42 Section 3.3	0,00303	USEPA AP-42 Section 3.3

CO2 - kg CO2/l		
Combustible	kg CO2/l	Fuente
Diésel	Density [g/l]	848,26
	Weight % of Carbon Content [%]	87
	CO2/C	3,67
	CO2 Efficiency Factor [%]	99
	g CO2/l	2681,33
	kg CO2/l	2,68
Gasoline and Diesel Industrial Engines-Emission Factor Documentation for AP-42 Section 3.3, USEPA, October 1996; www.epa.gov		
* This value has been obtained assuming a value of diesel density of 0,848 kg/l (PaLATE)		

Heat Content [MJ/L]		
Type of fuel	Heat Content	Fuente
Diesel	35,83	PaLATE (University of Berkeley)
LPG	25,90	PaLATE (University of Berkeley)

kg SO2/l (Vehicles)		
Combustible	kg SO2/l	Fuente
Diésel	0,00E+00	Usabiaga, 2009. El reequilibrio modal y el Ecobono. UPC (FPC)
* Asumiendo un valor de la densidad desl diesel igual a 0,848 kg/l (PaLATE)		

FREIGHT TRUCKING EMISSIONS					
REFERENCE: OECD. 1997. The Environmental Effects of Freight. Table 9. Truck Air Pollution Emission Factors, in grams/tonne-km					
		Emission factor, grams/tonne-km (g/Ton-Km)			
		CO	CO ₂	NO _x	SO ₂
OECD (Europe)	Long distance trucks	0,25	140	3,00	0,18

Distancias de transporte		
Ruta	Distancia [km]	Fuente
Desde la Planta de Producción de Mezcla hasta Obra	20	Milachowski, 2011. LIFe CYCLe AssessMent For roAd ConstruCtIon And use. EUPAVE.

PATCHING							
Capa	Fuente	No. Operaciones	Energía (MJ/ton)	CO ₂ (kg/ton)	SO ₂ (kg/ton)	CO (kg/ton)	Nox (kg/ton)
Riego (10% de mezcla)	PaLATE	1	17,07	969,32	4,88	4,10	5,39

Factores de Conversión		
m	1,0000	m
km	0,0010	m
in	0,0254	m
ft	0,305	m
yd	0,914	m
miles	1,609	km
1 inch	0,02778	yards
1 mile	1760,39	yards
1 ft	0,3337	yards
	0,764	m ³
1 yd ³	764000	ml
1 yd ³	27,00	cf
1 yd ³	3,79	l
1 gal	1000	kg
	1,102	ton
MT or Mg	1102	ton
1 Mg	2000	lb
1 Gg	454	g
1 ton	1000	g
1 lb	0,000949	Btu
1 kg	948,90	Btu
	0,278	kWh
1 J	1	passenger
1 MJ	0,75	kW

Equivalencias			
1hp	0,75	kW	FUENTE
1kwh	3,60	MJ	(http://www.convertworld.com/es/energia/)
1 kg Light fuel oil	42,5	MJ	(http://www.fao.org/docrep/t0269e/t0269e0c.htm)
1 kg Heavy fuel oil	43,6	MJ	(http://www.fao.org/docrep/t0269e/t0269e0c.htm)

Anexo II.

LIGANTES BITUMINOSOS



CEPSASFALT 50/70

DEFINICIÓN:

Betún asfáltico que cumple con las especificaciones del B 50/70 del artículo 211 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en el Anexo Nacional de la norma UNE EN 12591 para el betún 50/70.

Característica	Unidad	Norma	mín.	máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C)	0,1 mm	EN 1426	50	70
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46	54
Punto de rotura Fraass	°C	EN 12593	-	-8
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	230	-
Resistencia al endurecimiento a 163 °C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	EN 1426	50	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABAJO:

- Temperatura de mezcla (°C): 150-160
- Temperatura de almacenamiento y uso del ligante(°C): 150-160
- Temperatura de compactación (°C): 145-155
- Temperatura máxima de calentamiento (°C): 170



CEPSASFALT BT 50/70

DEFINICIÓN:

Betún asfáltico especialmente formulado para permitir la fabricación y puesta en obra de mezclas asfálticas a temperaturas inferiores a las habituales que cumple con las especificaciones del B 50/70 del artículo 211 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en el Anexo Nacional de la norma UNE EN 12591 para el betún 50/70.

Característica	Unidad	Norma UNE EN	mín.	máx.
Betún Original				
Penetración (25 °C)	0,1 mm	1426	50	70
Índice de penetración	-	12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	1427	46	54
Punto de rotura Fraass	°C	12593	-	-8
Solubilidad	%	12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	ISO 2592	230	-
Resistencia al endurecimiento a 163 °C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	1426	50	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	1427	-	11

TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABAJO(*):

- Temperatura de mezcla (°C): 125
- Temperatura de almacenamiento y uso del ligante(°C): 150-160
- Temperatura de compactación (°C): 120
- Temperatura máxima de calentamiento (°C): 170

- Mezclas semiclientes.
- Mezclas que necesiten un tiempo elevado de transporte o puesta en obra.
- Mezclas convencionales.

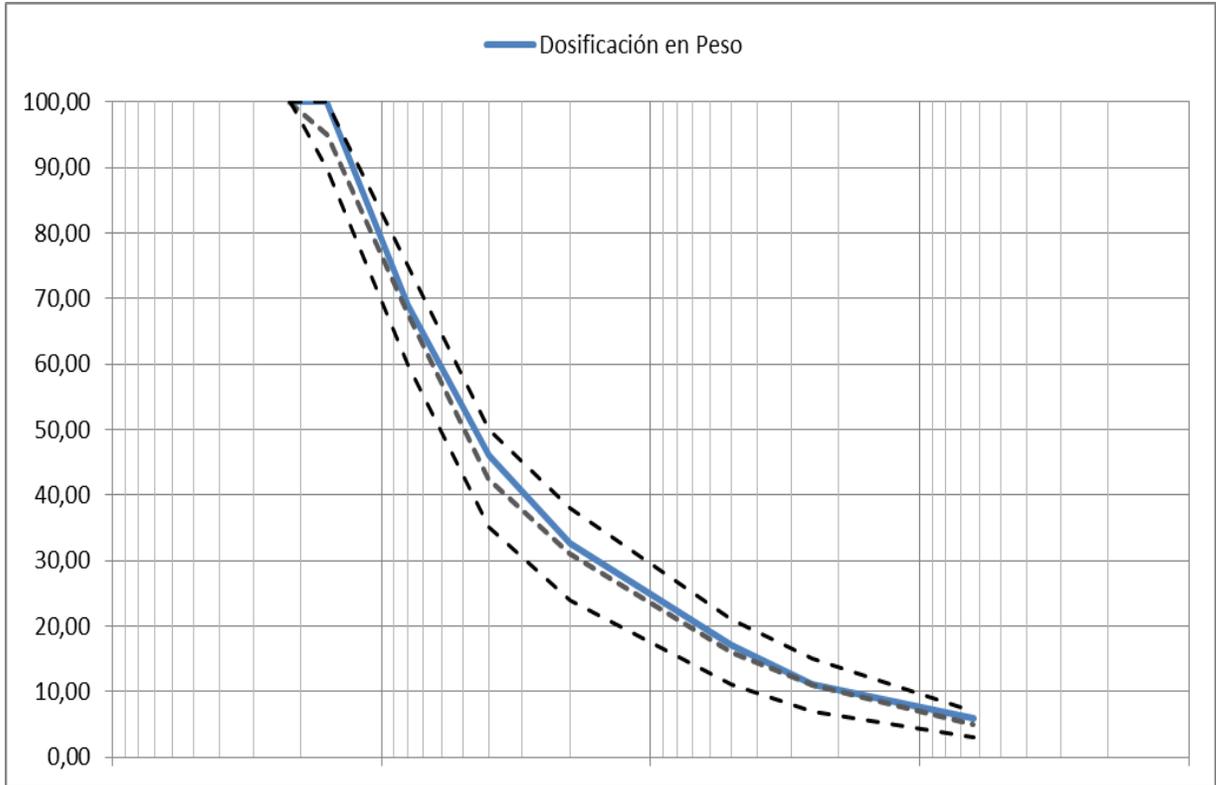
Anexo III. MEZCLAS

MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

AC16S				
Huso	% Pasa	% Centro Huso AC16	Límite inferior AC16	Límite superior AC16
22	100,00	100	100	100
16	100,00	95	90	100
8	69,00	67,5	60	75
4	46,00	42,5	35	50
2	32,50	31	24	38
0,5	17,00	16	11	21
0,25	11,00	11	7	15
0,063	6,00	5	3	7

Dosificación Peso Mezcla AC-16-S	
Probeta (gr):	1200,00
% betún/áridos:	4,7
% betún/mezcla:	4,5

MEZCLA AC-16-S								
Huso	% Pasa	% Retenido	% Retenido Fracción	Peso AC-16-S (gr)	Material Ofita (gr)	Material Caliza (gr)	Cemento (gr)	Total Mezcla (gr)
22	100,00	0	0	0	0,00			0,00
16	100,00	0	0	0	0,00			0,00
8	69,00	31	31	372	372,00			372,00
4	46,00	54	23	276	276,00			276,00
2	32,50	67,5	13,5	162	162,00			162,00
0,5	17,00	83	15,5	186		186,00		186,00
0,25	11,00	89	6	72		72,00		72,00
0,063	6,00	94	5	60		60,00		60,00
		100	6	72			72,00	72,00
				Pesos:	810,00	318,00	72,00	1200,00
				%:	67,50	26,50	6,00	100,00

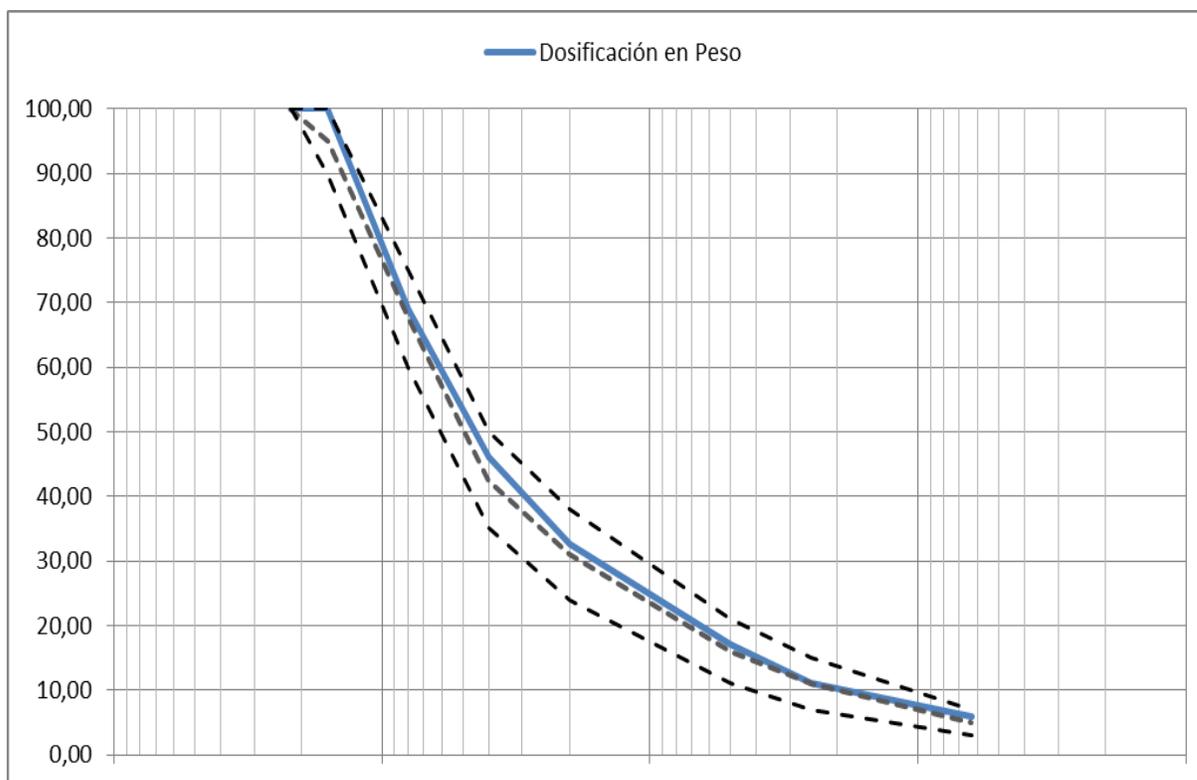


MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES

AC16S				
Huso	% Pasa	% Centro Huso AC16	Límite inferior AC16	Límite superior AC16
22	100,00	100	100	100
16	100,00	95	90	100
8	69,00	67,5	60	75
4	46,00	42,5	35	50
2	32,50	31	24	38
0,5	17,00	16	11	21
0,25	11,00	11	7	15
0,063	6,00	5	3	7

Dosificación Peso Mezcla AC-16-S	
% betún/áridos:	4,7
% betún/mezcla:	4,5
% Cera/mezcla	0,24

MEZCLA AC-16-S									
Huso	% Pasa	% Retenido	% Retenido Fracción	Peso AC-16-S (gr)	Material Ofita (gr)	Material Caliza (gr)	Cemento (gr)	Total Mezcla (gr)	
22	100,00	0	0	0	0,00			0,00	
16	100,00	0	0	0	0,00			0,00	
8	69,00	31	31	372	372,00			372,00	
4	46,00	54	23	276	276,00			276,00	
2	32,50	67,5	13,5	162	162,00			162,00	
0,5	17,00	83	15,5	186		186,00		186,00	
0,25	11,00	89	6	72		72,00		72,00	
0,063	6,00	94	5	60		60,00		60,00	
		100	6	72			72,00	72,00	
					Pesos:	810,00	318,00	72,00	1200,00
					%:	67,50	26,50	6,00	100,00



MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES+ RAP

Granulometría RAP		
TAMICES	%	%
U.N.E.	PASA	RETENIDO
	100,0	0,0
22,0	100,0	0,0
16,0	100,0	0,0
8,0	92,1	7,9
4,0	74,7	25,3
2,0	57,9	42,1
0,500	27,7	72,3
0,250	20,2	79,8
0,125	16,7	83,3
0,063	12,5	87,5

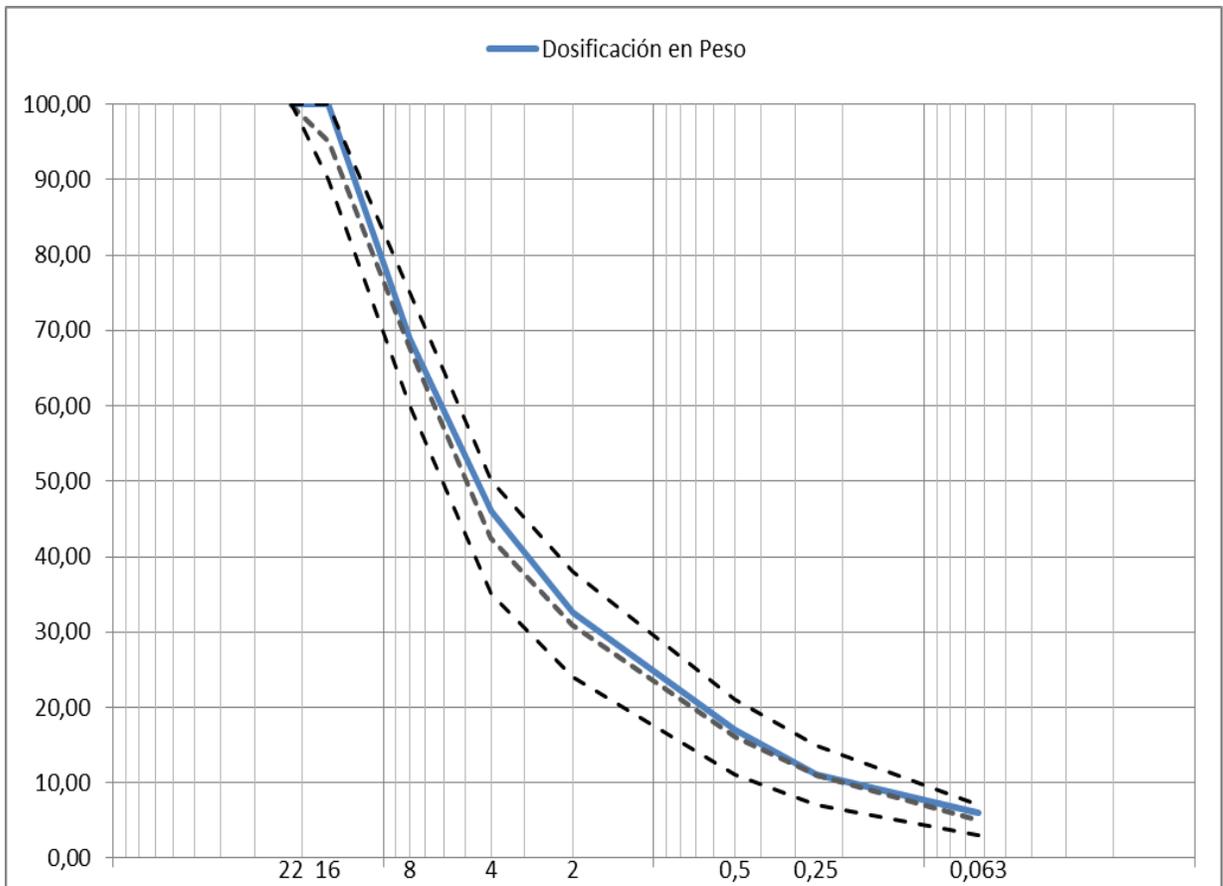
	AC16S				
	Huso	% Pasa	% Centro Huso AC16	Límite inferior AC16	Límite superior AC16
0,01	22	100,00	100	100	100
0,01	16	100,00	95	90	100
0,01	8	69,00	67,5	60	75
0,01	4	46,00	42,5	35	50
0,01	2	32,50	31	24	38
0,01	0,5	17,00	16	11	21
0,01	0,25	11,00	11	7	15
0,01	0,063	6,00	5	3	7

Dosificación Peso Mezcla AC-16-S	
Factor limitante:	15
% betún residual:	0,7
% betún/áridos:	4,0
% betún/mezcla:	3,8
% Cera/mezcla	0,24

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Análisis del ciclo de vida de Mezclas Bituminosas Semicalientes con árido reciclado

MEZCLA AC-16-S									
Huso	% Pasa	% Retenido	% Retenido Fracción	Peso AC-16-S (gr)	Material Fresado (gr)	Material Ofita (gr)	Material Caliza (gr)	Cemento (gr)	Total Mezcla (gr)
22	100,00	0	0	0	0,00	0,00			0,00
16	100,00	0	0	0	0,00	0,00			0,00
8	69,00	31	31	372	14,21	357,79			372,00
4	46,00	54	23	276	31,33	244,67			276,00
2	32,50	67,5	13,5	162	30,25	131,75			162,00
0,5	17,00	83	15,5	186	54,34		131,66		186,00
0,25	11,00	89	6	72	13,52		58,48		72,00
0,063	6,00	94	5	60	13,86		46,14		60,00
		100	6	72	22,49			49,51	72,00
				Pesos:	180,00	734,21	236,28	49,51	1200,00
				%:	15,00	61,18	19,69	4,13	100,00



Anexo IV. RESUMEN DE LA ORDEN FOM/3459/2003, DE 28 DE NOVIEMBRE, POR LA QUE SE APRUEBA LA NORMA 6.3 IC: REHABILITACIÓN DE FIRMES, DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS (BOE DE 12 DE DICIEMBRE DE 2003)

El objeto de esta norma es establecer los criterios que permitan seleccionar y proyectar la solución idónea de rehabilitación de un firme de carretera. Para ello, se pone a disposición del proyectista un procedimiento para la evaluación y análisis del estado de un firme y una gama de posibles soluciones de rehabilitación.

Se ha considerado conveniente incluir en esta norma referencias a materiales y técnicas que, habiendo demostrado ya su idoneidad.

Se dan también directrices sobre cuándo y cómo emplear estas técnicas.

ESTUDIO DE LA REHABILITACIÓN DE UN FIRME

PLANTEAMIENTO DE LA NECESIDAD DE REHABILITACIÓN

Las actuaciones de rehabilitación de firmes y pavimentos se clasificarán, según su finalidad, en estructurales y superficiales. Las primeras tendrán por objeto aumentar significativamente la capacidad estructural del firme existente, adecuándola a las acciones del tráfico previsto durante su período de servicio. El objeto de las segundas será conservar o mejorar sus características funcionales (seguridad, comodidad, etc.) y la protección del conjunto del firme (aumento de la durabilidad, impermeabilidad, uniformidad, aspecto, etc.).

NECESIDAD DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL

La necesidad de una rehabilitación estructural se planteará si concurre alguna de las circunstancias siguientes:

1. Agotamiento estructural del firme.
2. Previsión de crecimiento importante de la intensidad de tráfico pesado.
3. Gastos excesivos de conservación ordinaria.
4. Afección significativa a la vialidad de las actuaciones de conservación ordinaria.

NECESIDAD DE REHABILITACIÓN SUPERFICIAL

La rehabilitación o renovación superficial de un tramo de carretera podrá justificarse si se produce alguno de los supuestos siguientes:

1. Cuando no sea necesaria una rehabilitación estructural, pero el estado superficial del pavimento presente deficiencias que afectan a la seguridad, a la comodidad o a la durabilidad del pavimento. Las deficiencias son:
 - Pavimento deslizante por pulimento o por falta de macrotextura.
 - Pavimento deformado longitudinal o transversalmente, con una regularidad superficial inadecuada.
 - Pavimento fisurado, descarnado o en proceso de desintegración superficial.
2. Cuando existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial, pero estén comprendidos entre dos contiguos que sí la necesitan, podrá

ser conveniente dar continuidad a la superficie de rodadura.

3. Por razones de conservación preventiva, en ciertos casos convendrá aplicar el criterio anterior a tramos o grupos de tramos de longitud mayor, en los que no sea estrictamente necesaria la rehabilitación (estructural o superficial).

MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADECUADA

La determinación de la solución más adecuada deberá cubrir las siguientes etapas en el caso más general:

- Recopilación y análisis de datos.
- Evaluación del estado del firme y de su nivel de agotamiento.
- Diagnóstico sobre el estado del firme.
- Análisis de soluciones y selección del tipo más apropiado.
- Proyecto de la solución adoptada.

2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Para poder evaluar el estado de un firme se deberán analizar previamente sus parámetros más significativos. Se pueden destacar:

- Características del firme existente y estado del pavimento.
- Entorno.
- Solicitaciones del tráfico.

ANÁLISIS DE SOLUCIONES Y SELECCIÓN DEL TIPO MÁS APROPIADO

GENERALIDADES

La selección y el proyecto de la solución de rehabilitación se individualizará para cada uno de los tramos homogéneos de comportamiento uniforme que se hayan determinado, basándose en la inspección visual y en la auscultación del firme y, en especial, en el estudio de las deflexiones, realizado.

ACTUACIONES DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL

Las soluciones a aplicar en una rehabilitación estructural podrán ser de los siguientes tipos:

- Eliminación parcial y reposición del firme existente.
- Recrecimiento aplicado sobre el pavimento existente.
- Combinación de los dos tipos anteriores.
- Reconstrucción total del firme, que eventualmente podrá incluir la explanada.

La selección de la solución de rehabilitación que se vaya a adoptar se basará en un estudio

técnico y económico en el que se analicen y valoren no sólo las opciones más adecuadas para cada tramo homogéneo de comportamiento uniforme, sino también la mejor combinación posible entre todas ellas. En el análisis deberán valorarse la disponibilidad de los materiales, la facilidad de ejecución, la durabilidad de los firmes, los costes de ejecución, los desvíos provisionales, la afección al tráfico durante las obras, la elevación de barreras y, en su caso, gálibos, aceras, etc., así como las consideraciones que la legislación vigente establezca en materia ambiental y de seguridad y salud.

Habrá que considerar, entre otros, los siguientes factores:

- Características del tramo (calzada única o doble, si existen limitaciones de gálibo, etc.).
- Coste de la actuación.
- Coste ocasionado a los usuarios por la ejecución de las obras.
- Vida útil prevista de la actuación. Por aspectos relacionados con la repercusión en la fluidez del tráfico y en la seguridad de la circulación.
- Coste de la conservación ordinaria de la actuación a lo largo de su vida útil.

Como reglas generales pueden indicarse las siguientes:

- La solución de eliminación parcial y reposición del firme, seguida o no de un recrecimiento de espesor limitado (capa de rodadura en toda la anchura de la calzada), suele ser la más indicada en los casos en que exista un carril que requiera una rehabilitación mucho más importante que la de los restantes.
- Atendiendo únicamente a criterios de tipo funcional, la solución de eliminación parcial y reposición del firme se elegirá siempre que tenga que mantenerse la rasante por limitaciones de gálibo.
- En los demás casos, la solución de recrecimiento podrá tener, a veces, la ventaja de un menor perjuicio para los usuarios, al ser las interrupciones y cortes de circulación durante las obras menos prolongados.

Seleccionadas las soluciones más apropiadas, se procederá a un análisis técnico y económico conjunto de todo el proyecto. A partir de este análisis, deberá elegirse la solución de rehabilitación más apropiada desde el punto de vista económico y de seguridad de la circulación vial, como combinación de las diversas soluciones técnicamente aconsejables en cada tramo.

Así, en la rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso, además de realizar el estudio de las medidas de deflexión en los distintos puntos para así localizar las zonas singulares donde el agotamiento afecte a la explanada, se debe analizar qué tipo de actuación es la más adecuada.

ACTUACIONES DE REHABILITACIÓN SUPERFICIAL

Cuando el estado del firme no haga necesaria la realización de una actuación de rehabilitación estructural, pero la superficie del pavimento presente deterioros que afecten a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario o a la durabilidad del pavimento o del firme, se procederá a su rehabilitación superficial.

CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE RECICLADO DE FIRMES

En el proyecto de la rehabilitación de un firme se podrán utilizar las técnicas de reciclado teniendo en cuenta las limitaciones y prescripciones siguientes:

- carreteras con categoría de tráfico pesado T00 no se podrán utilizar en ningún caso materiales reciclados.
- En carreteras con categoría de tráfico pesado T0 no se podrán utilizar en ningún caso las técnicas de reciclado in situ en frío (con emulsión bituminosa o con cemento). Únicamente se podrán emplear mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en el recrecimiento de arceles, siempre que sobre ellas se disponga posteriormente como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas en caliente en un espesor total mínimo de 10 cm.
- En carreteras con categoría de tráfico pesado T1 se podrán utilizar las mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en los mismos supuestos indicados para carreteras con categoría de tráfico pesado T0, considerando, en este caso, que sobre las capas de reposición con mezclas bituminosas recicladas en central deben colocarse capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 6 cm. Además podrán emplearse mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión bituminosa en arceles cuando sobre este material se disponga como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 8 cm.
- Para carreteras con categorías de tráfico pesado T2 a T4, incluidas las vías de servicio no agrícolas de autovías y autopistas, podrán utilizarse todas las técnicas de reciclado indicadas, así como el reciclado in situ con cemento, con la condición de disponer sobre cualquiera de ellas, como mínimo, una capa de mezcla bituminosa en caliente del tipo densa (D) o semidensa (S).

REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE FIRMES QUE TENGAN PAVIMENTO BITUMINOSO

Entre las posibles soluciones de rehabilitación estructural de firmes:

- Eliminación parcial de una parte del firme existente y reposición con mezcla bituminosa.
- Recrecimiento mediante mezclas bituminosas o mediante pavimento de hormigón.
- Combinación de los dos tipos de actuación anteriores, incluyendo las técnicas de reciclado de materiales de acuerdo con lo expuesto en el apartado 7.4.

No se considerará como solución general de rehabilitación estructural la demolición y

reconstrucción total del firme en toda la longitud, que deberá reservarse sólo para zonas o tramos muy excepcionales.

Previamente a la ejecución de cualquier tipo de rehabilitación generalizada, se sanearán los blandones y zonas singulares de longitud inferior a 100 m.

Los recrecimientos podrán también realizarse con materiales distintos a las mezclas.

REPARACIÓN PREVIA DE LAS ZONAS SINGULARES

DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS SINGULARES

Son zonas singulares las que presentan una falta de capacidad estructural que afecta a la explanada o tiene su origen en ella. Suelen presentarse superficialmente como deterioros localizados, de pequeña longitud (inferior a 100 m) y con un aspecto visual.

A efectos prácticos, si no se dispusiera de un estudio específico del tramo que demuestre lo contrario, se entenderá que el agotamiento estructural afecta a la explanada no sólo en las zonas localizadas de blandones, detectadas visualmente, sino también cuando para la categoría de tráfico pesado correspondiente, el valor de la deflexión patrón en un punto determinado supere los valores indicados.

CRITERIOS DE PROYECTO

Debe tenerse en cuenta que, en la mayoría de las ocasiones, las deflexiones excesivas en zonas de desmonte suelen tener su origen en defectos de drenaje, situación que también se puede producir en terraplenes en zonas bajas donde no tienen salida las aguas; en ambos casos deberá corregirse el drenaje previamente a la rehabilitación. Por otra parte, puede que, aunque no se tengan valores excesivos de deflexión, existan deficiencias generalizadas de drenaje (por lo menos, en lo que al drenaje superficial se refiere) que podrían repercutir negativamente a corto plazo en la capacidad resistente del firme y que, en consecuencia, habría que corregir también.

Las zonas singulares, de longitud inferior a 100 m, en las que el agotamiento estructural afecte a la explanada, se sanearán demoliendo la totalidad del firme y excavando una profundidad de 80 cm por debajo de la cota de la explanada. En todos los casos en los que sea necesario, se actuará sobre el drenaje, asegurando la salida del agua que pudiera acumularse en el fondo de la zona excavada.

La superficie de la explanada deberá quedar al menos 60 cm por encima del nivel más alto previsible de la capa freática donde el suelo sea seleccionado, 80 cm donde sea adecuado, 100 cm donde sea tolerable y 120 cm donde sea inadecuado o marginal. A tal fin se adoptarán medidas tales como la colocación de drenes subterráneos, la interposición de geotextiles o de una capa drenante, etc., y se asegurará la evacuación del agua infiltrada a través del firme de la calzada y de los arcenes o a través de la junta entre éstos y aquélla. En todo caso, se tendrán en cuenta los criterios indicados en la normativa vigente sobre drenaje.

En el caso de que la técnica escogida para la rehabilitación del firme sea la de eliminación parcial y reposición, en firmes semirrígidos la excavación realizada se rellenará con zahorra artificial

hasta la cota de la explanada, y sobre ella se extenderá una mezcla bituminosa hasta enrasar con la superficie del pavimento. En firmes flexibles y semiflexibles se rellenará con zahorra artificial hasta la cota inferior de la mezcla bituminosa del firme adyacente y sobre ella se extenderá una mezcla bituminosa hasta aacvnzar la superficie del pavimento.

En todos los casos, se preverá el drenaje necesario para la salida del agua que se pueda acumular en el fondo de la zona excavada y, si se juzga necesario, se completará la solución con medidas de prevención de una posible contaminación por finos arcillosos.

Otro tipo de reparaciones sólo podrá utilizarse previo estudio y justificación de su idoneidad y con la aprobación expresa de la Dirección General de Carreteras.

ELIMINACIÓN PARCIAL Y REPOSICIÓN DEL FIRME EXISTENTE

CRITERIOS GENERALES

Consistirá esta solución en la eliminación y retirada por medios mecánicos de los materiales que componen el firme hasta la profundidad precisa y su reposición con el mismo espesor de mezclas bituminosas. La eliminación parcial de las capas aglomeradas en firmes con pavimento bituminoso se realizará siempre mediante técnicas de fresado.

Para la delimitación de la superficie y de la profundidad de esta solución se partirá de los valores de la deflexión patrón en los diferentes puntos de medida y de los resultados de una inspección visual detallada.

Se considerará que existe agotamiento estructural del firme cuando se observe en su superficie un agrietamiento de tipo estructural (zonas del carril cuarteadas en malla gruesa o fina y zonas de las rodadas con grietas longitudinales, ramificadas o no). En este caso, si no se conoce la profundidad del agrietamiento, se procederá a un reconocimiento más detallado del firme del carril mediante la extracción de testigos y la ejecución de calicatas escalonadas capa a capa.

CRITERIOS DE PROYECTO

Se considerará que el firme tiene una vida residual insuficiente siempre que el valor de la deflexión patrón en un punto determinado supere los umbrales, salvo que un estudio y análisis más específico del estado de cada tramo homogéneo justifiquen la asignación de valores distintos para dichos umbrales.

En el caso en que, después de eliminar las capas agrietadas, queden mezclas bituminosas con suficiente vida útil, los espesores de éstas deberán considerarse, a efectos de dimensionamiento, si no presentan fisura, como espesores de mezclas bituminosas nuevas, aplicando a su espesor real el coeficiente de equivalencia de 0,75.

SELLADO DE GRIETAS

Aunque el sellado de grietas en la superficie del pavimento debe considerarse como una actuación específica de conservación, puede darse el caso de que en las zonas no existan grietas

reflejadas o de otro origen no estructural. En este caso, se sellarán siempre que la longitud de sellado sea inferior a 3 km por kilómetro de calzada, incluso si estuviera previsto un recrecimiento en dichas zonas.

RECRECIMIENTO DEL FIRME EXISTENTE

El recrecimiento consistirá en la extensión de una o varias capas de mezcla bituminosa sobre el firme existente. La actuación se extenderá a todo el tramo definido como homogéneo y de comportamiento uniforme.

Previamente, se procederá a la reparación de los blandones y de las zonas singulares.

Una vez realizadas las eventuales reparaciones y sellados de grietas, se procederá al recrecimiento con el espesor de mezcla bituminosa indicado.

En las zonas de rehabilitación con recrecimiento, además de tener en cuenta los espesores mínimos indicados, se deberá cumplir, en todos los casos, la condición de que el espesor total de mezclas bituminosas nuevas acorde a lo que refleja la norma. A efectos de la evaluación de dicho espesor total, no se tendrá en cuenta el de las capas del firme existente que estén afectadas por cuarteo, pero sí el de las capas de mezcla bituminosa que no presenten fisuras.

Si quedan zonas de pequeña longitud relativa entre tramos sobre los que es necesario actuar, se recomienda la extensión de una capa semejante en toda la carretera, con el fin de dar continuidad a la capa de rodadura. Su espesor dependerá de su naturaleza y de la categoría del tráfico pesado y se fijará de acuerdo con los criterios constructivos establecidos.

COMBINACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE ELIMINACIÓN PARCIAL Y REPOSICIÓN Y DE RECRECIMIENTO

Esta solución que deberá ser la más usual, consistirá en una combinación de la de eliminación parcial y reposición del firme existente. La solución de eliminación parcial del firme existente y su reposición con mezclas bituminosas (convencionales o recicladas) hasta la misma cota que la superficie original del pavimento podrá ir seguida de un recrecimiento con mezcla bituminosa extendida en toda la anchura de la calzada. Asimismo, la solución de recrecimiento con mezclas bituminosas podrá ir precedida de una eliminación parcial y reposición de firme en las zonas en que se considere necesario.

En ambos casos se procederá contabilizando en el espesor de mezclas bituminosas nuevas, tanto el de la mezcla de reposición como el del recrecimiento.

OTROS TIPOS DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DEL FIRME EXISTENTE

En determinados casos también podrán utilizarse en el recrecimiento de firmes de pavimento bituminoso otros materiales.

Si el tramo en estudio tiene una menor estructura de firme, pueden resultar adecuadas, por

razones técnicas o económicas que habrá que valorar expresamente en cada caso concreto, otras soluciones de rehabilitación estructural. Puede ser el caso de algunas carreteras convencionales en servicio con una categoría de tráfico pesado T3 (T32) o T4 (T41 y T42). Entre los materiales cuyo empleo puede ser considerado, siempre que lo avale la experiencia local, cabe citar las capas granulares, las gravas tratadas (con cemento, escoria o emulsión bituminosa), así como, para las capas de rodadura, las mezclas bituminosas abiertas en frío y los tratamientos superficiales (lechadas bituminosas y riegos con gravilla).

En todo caso, para las categorías de tráfico pesado T3 (T32) y T4 (T41 y T42) en las que pueden ser recomendables soluciones basadas en el empleo de capas granulares y de mezclas bituminosas.

ZONAS DE ACTUACIÓN PREVENTIVA

En la zona denominada de actuación preventiva el valor de la deflexión de cálculo es menor del que se requiere para una actuación de rehabilitación estructural, al no alcanzar los umbrales de agotamiento definidos. En estos casos suele ser aconsejable una actuación preventiva que prolongue la vida útil del firme antes de que la aceleración de las degradaciones obligue a una rehabilitación estructural más profunda.

Las actuaciones preventivas consistirán, en general, en recrecimientos de pequeño espesor. Para carreteras de categorías de tráfico pesado T00 y T0 únicamente se admitirá el empleo de mezclas drenantes y mezclas bituminosas discontinuas en caliente, teniendo en cuenta siempre las características de la capa de rodadura de acuerdo con los criterios constructivos establecidos. Para el resto de las carreteras, también podrán utilizarse tratamientos superficiales del tipo lechada bituminosa, dada la capacidad de éstos para impermeabilizar. No obstante, para carreteras con categorías de tráfico pesado T1 y T2 serán preferibles los recrecimientos con mezclas bituminosas en caliente, pues supone una mayor prolongación de la vida útil de la sección estructural del firme.

El momento adecuado para llevar a cabo una actuación preventiva se deducirá de los estudios técnicos y económicos en los que se tenga en cuenta la evolución previsible del estado del firme, de acuerdo con sus características (tipo, espesores, edad, estado, tráfico, clima, etc.), la prolongación de la vida útil que suponen las distintas opciones de actuación preventiva y de rehabilitación, y el coste de las alternativas posibles.

REHABILITACIÓN SUPERFICIAL

La rehabilitación o renovación superficial tiene por objeto restaurar o mejorar las características superficiales del pavimento, adecuándolas a sus necesidades funcionales y de durabilidad. A diferencia de la rehabilitación estructural, no tiene como finalidad aumentar la capacidad resistente del firme, aun cuando en determinados casos pueda mejorarla.

La carretera objeto de estudio se dividirá en tramos de comportamiento superficial uniforme, de acuerdo con los datos básicos, la inspección visual y la auscultación con equipos de medida de características superficiales. Analizadas las deficiencias, se corregirán con los procedimientos y materiales que se indican a continuación.

PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS ESPECÍFICAS PARA LA REHABILITACIÓN SUPERFICIAL

Según la característica superficial que sea necesario mejorar, dentro de los distintos procedimientos posibles de rehabilitación superficial, se elegirá entre los que se indican a continuación, salvo justificación en contrario.

Cuando sea necesario además reducir el ruido de rodadura, podrá recurrirse al empleo de capas de rodadura drenantes o de mezclas bituminosas discontinuas en caliente, justificando debidamente la solución de acuerdo con las indicaciones de los párrafos siguientes.

ADHERENCIA NEUMÁTICO-PAVIMENTO (TEXTURA Y RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO)

La extensión de una capa de rodadura de mezclas bituminosas, proyectada para la mejora de la regularidad superficial, o para una rehabilitación estructural, contribuirá también a regenerar la adherencia neumático-pavimento. Por ello, la resolución específica de una inadecuada textura superficial de un tramo de carretera se llevará a cabo sólo si se dispone de un adecuado perfil longitudinal y transversal, así como de una suficiente capacidad estructural del firme.

En el caso de carreteras con categoría de tráfico pesado T00 y T0 o con intensidad de circulación por calzada mayor de 10 000 vehículos/día, se proyectará un tratamiento con mezclas bituminosas discontinuas en caliente. En los demás casos se podrá proyectar también un tratamiento superficial con lechadas bituminosas. En las carreteras con categorías de tráfico pesado T3 (T32) y T4 (T42 y T41), opcionalmente podrán utilizarse riegos con gravilla, siempre que no tengan la función de vías de servicio no agrícola de autopistas y autovías, en cuyo caso se utilizarán lechadas bituminosas.

Como solución en tramos localizados, a la espera de otra más definitiva con aportación de materiales, podrán emplearse para la mejora de la textura superficial técnicas de microfresado superficial.

En el caso de detectarse problemas de deslizamiento, se corregirán a través del tratamiento de la superficie mediante microfresado o mediante técnicas con aportación de material, previa justificación y aprobación de la Dirección General de Carreteras.

Con el fin de mejorar la seguridad y la comodidad en tiempo de lluvia, sobre pavimentos bituminosos podrán utilizarse mezclas drenantes, previa justificación y siempre que las características climáticas, de trazado y de tráfico lo aconsejen, especialmente en zonas urbanas y periurbanas con alta intensidad de tráfico.

REGULARIDAD SUPERFICIAL

Para corregir deficiencias de regularidad superficial en cualquier tipo de pavimento, se utilizarán técnicas de eliminación (mediante cepillado o fresado), recrecimiento o combinación de ambas. Cuando se evalúe la conveniencia de este tipo de actuaciones y se decida su aplicación.

En cualquier pavimento, los puntos bajos producidos por asentamiento general de la explanada o por consolidación de rellenos mal compactados (por ejemplo, junto a los estribos de las obras de paso), se corregirán con mezcla bituminosa, adecuando las capas y sus espesores para conseguir las prescripciones referentes a la regularidad superficial indicadas en la tabla 10.

TRATAMIENTO DE GRIETAS

Aunque el sellado de grietas en pavimentos bituminosos es una operación habitual de conservación, cuando sea necesario hacerla para asegurar la integridad e impermeabilidad del firme.

MATERIALES ESPECÍFICOS DE REHABILITACIÓN SUPERFICIAL

Las características generales de los materiales y la ejecución de las unidades de obra serán las definidas en el articulado del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) o del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras y Puentes (PG-4).

ANÁLISIS DE SOLUCIONES

Entre las posibles soluciones de rehabilitación superficial deberá realizarse un estudio técnico y económico, seleccionando aquella que, además de dar solución a los problemas existentes, sea más ventajosa en la relación coste-durabilidad y haciendo prevalecer en cualquier circunstancia los criterios de mejora de la seguridad de la circulación.

Si, además de la rehabilitación superficial, el tramo objeto de estudio necesita una actuación de tipo estructural (incluida alguna con criterio preventivo) que suponga la extensión de una capa de rodadura nueva, se optará por la integración de ambas en la solución de rehabilitación estructural.

Anexo IV. MÁQUINAS

DYNAPAC LARGE PAVER RANGE

Dynapac F2500W / F2500C / F2500CS
Conventional Electric Control



Atlas Copco

THE F2500 LARGE PAVER RANGE is designed with conventional electric control with high paving capacity and high quality Dynapac vario screed. The pavers feature an efficient drive concept, best in class operator comfort as well as ease of service
 - a perfect recipe for excellent paving results!

PRECISE POWER & SMART DESIGN

CONVENTIONAL WHEELED POWER

The focus of the new F2500W is Quality, Reliability and Simplicity! The F2500W wheeled paver is a compact six wheel paver with powerful rear wheel drive that allows paving up to 6.6 m working width. The paver features a gas heated V5100TV vario screed with a range of leveling systems and offers the best paving results in your daily work. This paver is designed for safe operation. It has conventional electrics for easy operation and maintenance. Our F-series has an intuitive control panel with ergonomic operator platform. The robust partner for paving up to 6.6 m!

CONVENTIONAL TRACKED POWER

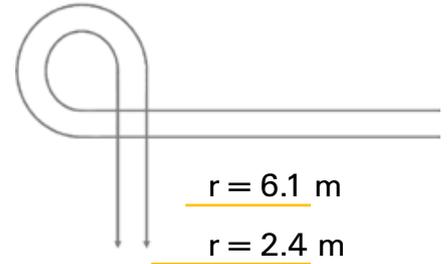
The focus of the F2500C & F2500CS tracked pavers is Quality, productivity and reliability! These pavers are designed for easy operation with high quality paving results. They have conventional electrics for easy operation and maintenance. Along with an efficient drive system that is most fuel efficient, we offer environmental friendly gas heated as well as electric heated screeds for perfect laying results. F2500 tracked pavers are equally suited for asphalt, soil or soil cement applications.

	F2500W
Eng. power at 2,200 min ⁻¹	110 kW
Theor. paving capacity	650 t / h
Max. working width	6.60 m

	F2500C	F2500CS
Eng. power at 2,200 min ⁻¹	110 kW	129 kW
Theor. paving capacity	650 t / h	750 t / h
Max. working width	8.10 m	9.00 m



OPTIMAL DRIVE



COMPACT DESIGN WITH GREAT MANEUVERABILITY

The F2500W wheeled paver is compact in dimensions that offer a 2.4 m inner turning radius for easy operation within city roads. The paver can handle narrow paving situations and with its 17 degree ramp angle is easy to transport.

PRECISE & PO



Excellent stability

The paver is well balanced with a low centre of gravity. The hydrostatic drive system offers a smooth driving experience with good speed ramp up. Thanks to the new hydrostatic brakes the paver has a smooth but effective service brake. In addition we offer a multi disc parking brake.

Outstanding traction

The paver features improved traction from its predecessors due to smart rear wheel drive along with wide tires. The new low profile tires give superior ground contact and effective traction in work as well as drive modes. The paver features an assymetric suspended axle that allows ground contact for the front tires in uneven ground conditions. This also improves our drive capability at all times.



WERFUL DRIVE

ALPHA-TRACK™

Our Alpha Track™ system for our tracked pavers is longer and wider. It has 320 mm wide rubber pads which give great ground contact. The tracks are very low and give an optimal dumping height. The high number of rollers inside the tracks improve maneuverability in curves. The tracks with independent planetary gear drive enable 360° turns. The tracks are specially designed for paving applications and have a higher rubber thickness for longer life and lower costs.

The F2500C / CS have optional rock deflector and push rollers with central pivots for oscillation. The low profile tracks have hydraulic tensioning and optimized suspension for even more traction and rigidity.

POWERFUL HYDRAULICS

The tracks are driven by powerful hydraulic motors with planetary gears for high torque to meet all traction demands. The track motors also have an automatic flow control system to maintain straight drive.

RELIABLE QUALITY



UNMATCHED

MATERIAL FLOW

Dynapac has optimised the hopper for outstanding material transfer. It is longer (1953 mm) and has a very low dumping height for fast and easy material transfer from lorries. Separately controlled hopper wings with generous solid rubber flaps ensure quick and easy handling of material. Chamfered hopper corners prevent cold material being left in the hopper.



SMART MATERIAL CONTROL

The conveyor tunnel has been redesigned for an optimal flow and minimal segregation. A twin conveyor system offers smooth transfer. High capacity kit is available for laying extra thick, wide layers. To ensure a flawless material flow, we offer a robust paddle sensors system for proportional control.

STRONG AUGER SYSTEM

The left and right augers are reversible and have independent drives. The auger speed is adjusted steplessly by the sonic sensors to ensure smooth material flow. The auger system has high torque to suit all paving widths as well as thickness. The auger height can be adjusted by 250 mm!



*Flow control with ultrasonic sensors
- ensures constant head of material*



Efficient and reliable power

Dynapac F-pavers are powered by a Cummins QSB6.7 water cooled diesel engine, that drives an efficient hydraulic system with power transfer through a split gear box. The efficient engine with new cylinder block offers high torque as well as improved fuel efficiency. The increased fuel tank capacity and low fuel consumption result in long intervals between refills. An improved, larger thermostatically controlled cooler eliminates the risk of the hydraulic system overheating even on extremely hot days!

Eco Mode

Dynapac Eco Mode is unique, as it offers stepless control. The driver can set the engine rpm according to the particular jobsite situation. This results in reduced paving costs, lower noise levels and an increased lifetime of your diesel engine.

PAVING QUALITY

Ergonomic Workplace

The operator's comfort is our priority. We focus on providing an ergonomic high end work place. the platform offers generous head room and a flat floor with a large storage space. The F-paver features a new platform that is higher and improves the all around view from the operators seat. It has 2 adjustable comfort seats and a slidable operation console with conventional toggle switches. The storage boxes are now bigger and moved in to the platform floor to improve the rear view. The new roof features four integrated working lights to the front and to the rear.



DYNAPAC F2500W PAVER FEATURES & BENEFITS

INTEGRATED WORKING LIGHTS

Atlas Copco offers integrated front and rear lights as well as lights for auger compartment.

ECO MODE

Unique step less Eco Mode function for reduced fuel consumption and lower noise levels. Also increases the engine lifetime.

HIGH CAPACITY HOPPER

Large hopper with separately controlled hopper wings and chamfered corners. The very low dumping height makes unloading trucks easy.

SMOOTH FLOW

Unmatched capacity and minimized segregation through a perfectly balanced, fully automated conveying system.

PUSH ROLLERS

Oscillating push rollers for reduced impact from trucks.

POWERFUL UNDERCARRIAGE

Drive system features powerful rear drive along with excellent turning radius of 2.4m (inner) and a wheel-base of 2,240mm.



CONVENTIONAL CONTROL

The conventional electrics with toggle switches are self-explanatory and easy to learn and maintain.

ERGONOMICS

High operator platform with swingable seats as well as adjustable dashboard for best view and comfort.

DYNAPAC SCREED

Most appreciated in market with integrated levelling functions for excellent quality. The Flexilever offers fast and convenient change of screed angle for different layers and thicknesses.

STRONG AUGER

Our strong auger system has an improved torque to provide a perfect paving result at all working widths. It features slim central drive for less segregation. The auger height can be adjusted manually or up to 250 mm.

SAFE TRANSPORT

Manually operated locking cylinders for the leveling arms. Safe and easy!

DYNAPAC F2500C / CS FEATURES & BENEFITS

ERGONOMICS

Excellent view to the hopper and all working areas due to the higher seat position and newly designed platform. The 2 ergonomic seats and control console can be adjusted to any position you need.

ECOMODE

Unique step less EcoMode function for reduced fuel consumption and lower noise levels. Also increases the engine lifetime

SAFE TRANSPORT

Manually operated locking cylinders for the levelling arms. Safe and easy!

DYNAPAC SCREED

Most appreciated in market with integrated levelling functions for excellent quality. The Flexilever offers fast and convenient change of screed angle for different layers of thicknesses.

STRONG AUGER

Our strong auger system has an improved torque to provide a perfect paving result at all working widths. It features slim central drive for less segregation. The auger height can be adjusted manually or up to 250 mm.



INTEGRATED WORKING LIGHTS

Atlas Copco offers integrated front and rear lights as well as lights for auger compartment.

CONVENTIONAL CONTROL

The conventional electrics with toggle switches are self-explanatory and easy to learn and maintain.

THERMOSTATIC CONTROL

The large thermostatically controlled cooler eliminates risk of overheating the hydraulic system.

HIGH CAPACITY HOPPER

Large hopper with separately controlled hopper wings and chamfered corners. The very low dumping height makes unloading trucks easy.

ALPHA - TRACK™

Outstanding driving experience, due to a well-balanced undercarriage. Dynapac wide Alfa tracks gives more ground contact and better traction with thick track pads specially designed for pavers.

PUSH ROLLERS

Oscillating push rollers for reduced impact from trucks.

HIGH PERFORMANCE SCREEDS



4-TUBE PRINCIPLE

Dynapac's screed is the most appreciated screed in the market, worldwide! The screed is extremely stable. Our patented four-guiding tube principle is responsible for the so far unmatched screed stability. We don't need any supporting rods for the screed, which makes all Dynapac screeds easy to assemble on site – a must for efficient jobsite management.

ELECTRIC OR GAS – YOUR CHOICE!

Our new optimized electrical heating system features improved insulation and a stronger generator that has significantly reduced heat-up time. The generator is driven by a flexible shaft from the gear box that offers great reliability and reduced maintenance. We are able to achieve even heat distribution with new heating coils for bottom plates and tampers.

Whoever opts for our gas heating system gets a remarkably shorter heat-up time. Amazing pavement quality from the first stretch of track!

Dynapac supports sustainable gas heating systems to reduce energy consumption as well as CO₂ emissions.



There's no need for supporting rods for the screed, which makes the assembly fast and easy to handle on site.

ECCENTRIC FLEXI LEVER

Dynapac's unique Flexi Lever quickly and conveniently changes the angle of attack. This offers a visual control of screed settings to adopt various layer thicknesses during the paving process. The adjustment is made with a simple grip.



ERGONOMIC SIDE SHIELD CONTROL

The height and the angle of the side shield are adjustable with only one crank. The crank is placed on top of the side shield below the remote control, creating an ergonomic and central workplace for the screed operator.



ERGONOMIC WORK PLACE

In addition to effective compaction the Dynapac screed offers great accessibility. The low height gives you a superior view into the auger compartment and constant control over material flow. This low profile screed provides a central, safe and ergonomic workplace.

VARIO SCREEDS

	V5100TV	V5100TVE	V6000TV	V6000TVE
Basic width	2.55 m	2.55 m	3.00 m	3.00 m
Hydraulically extendable to	5.10 m	5.10 m	6.00 m	6.00 m
Heating system	LPG	Electric	LPG	Electric

Maximum working width (with extension parts)

F2500W	6.60 m	-	-	-
F2500C	8.10 m	-	-	-
F2500CS	8.80 m	8.80 m	9.00 m	9.00 m

HIGH QUALITY SCREEDS



EASY TRANSPORTATION

Compact dimensions, high maneuverability and large ramp up angle of 16° together with large and easy accessible transport lugs, mean loading and transportation are easy to handle. The mechanical screed arm lock and mechanical lock for the hopper cylinder are safe to use and make it easy to transport the paver quickly.

MAINTENANCE WITHOUT OBSTACLES

We have cleared the way to provide you with an easy overview of maintenance. Hydraulic pumps, fuel caps, chain clamping device – each component is directly accessible and easy to find. A simple visual inspection of filters and engine parts allows you to quickly get started. It is a convenient combination you'll profit from every day.

RAPID ACCESS THROUGHOUT

The goal is to save you time and money through easy access. Therefore we've made the service points central and reachable. The fuse box is easy to access from the cabin platform allowing easy replacement. The sheer number of plug-and-play components also speeds up the maintenance process.



CONSTRUCTION TECHNIQUE SERVICE



ANYTIME, ANY PRODUCT, ANYWHERE YOU CAN COUNT ON US

Servicing your machines regularly is very important to ensure reliable operation and a long service-life. With pro-active service and preventive maintenance you minimize the risk of high production costs and breakdowns. You can select a service contract that meets your requirement for professional service in order to get the most out of your machine investment.

ALL-IN-ONE BOX KITS

An all-in-one box, tailored to match your equipment. The parts you need, when you need them! An all-in-one box contains all the parts required as part of the equipment's scheduled maintenance program. When installed by an Atlas Copco certified technician, you keep your downtime to a minimum and your equipment in top condition its entire life.

Easy to obtain and attractively priced, the most effective solution to keep your maintenance budget low.

Find a suitable kit at dynapac.com / kitselector

WHAT'S INCLUDED?

Maintenance contract

- Preventive maintenance
- Fluids
- Machine inspection

Care

- Preventive maintenance
- Fluids
- Machine inspection/Inspection protocols
- Extended warranty (also available as a separate product)

FLUIDS

- The right fluid optimizes machine performance
- Simplified selection process, less time spent on finding the right oil
- Delivery in a handy container, no need for transfer from an oil drum
- All-in-one delivery, less time spent on waiting and dealing with different suppliers
- One invoice, less administration

Find a suitable fluid at dynapac.com / fluidselector

BENEFITS

- Reduced costs
- Cost known upfront
- Extended warranty (Care)
- Professional and regular machine inspections
- Planned maintenance
- Increased resale value

Please contact your sales rep for more information.

TECHNICAL DATA DYNAPAC CONVENTIONAL LARGE PAVERS

	F2500W	F2500C	F2500CS
Weight, t	16,5	18	18
Basic width, m	2,55	2,55	2,55
Working width max, m	6,60	8,10	9,00
Working width min (w/reduction shoe), m	2,05	2,05	2,05
Placement thickness, mm	-150 up to +310	-150 up to +310	-150 up to +310
Capacity, t/h	650	650	750
Paving speed, m/min	30	30	30
Transport speed, km/h	15	4	4
Engine model	Cummins QSB6.7 - C173	Cummins QSB6.7 - C173	Cummins QSB6.7 - C173
Rated power KW @ 2200 rpm	110	110	129
Emissions	Stage IIIA (T3)	Stage IIIA (T3)	Stage IIIA (T3)
Electrical system, V	24	24	24
Fuel tank capacity, l	315	350	350
Hopper width internal, mm	3142	3292	3292
Dumping height center, mm	574	555	555
Crawler length mm	-	2900	2900
Crawler width, mm	-	320	320
Rear wheel	445/80R25	-	-
Front wheel	4 x 560/300-390	-	-
Final drive	Hydrostatic direct drives comprised of planetary gear units and hydraulic motors		
Conveyor type	Dual bar feeder	Dual bar feeder	Dual bar feeder
Conveyor width, mm	2 x 580	2 x 655	2 x 655
Conveyor control	Automatic with limit switches		
Auger diameter, mm	380	380	380
Auger control	Automatic with ultrasonic sensors		
Auger height adjustment, mm	250	250	250
Screed options			
Tamper & Vibration Vario screed V5100TV	YES	YES	YES
Tamper & Vibration Vario screed V5100TVE	NO	NO	YES
Tamper & Vibration Vario screed V6000TV	NO	NO	YES
Tamper & Vibration Vario screed V6000TVE	NO	NO	YES

COMMITTED TO SUSTAINABLE PRODUCTIVITY

We stand by our responsibilities towards our customers, towards the environment and the people around us. We make performance stand the test of time.

This is what we call - Sustainable Productivity.

Dynapac GmbH

Ammerländer St. 93 26203 Wardenburg, Germany
Phone: +49 4407 9720 - Fax: +49 4407 972307 www.atlascopco.com



Dynapac F2500C

Extendedoras de orugas

Atlas Copco



Datos técnicos

Pesos	
Peso (con la regla estandar)	18 t

Dimensiones	
Ancho básico	2,55 m
Ancho de trabajo, máximo	8,10 m
Ancho de trabajo, mínimo (con zapata de reducción)	2,05 m
Angulo rampa frontal	15°

Capacidad	
Espesor de tongada (max)	310 mm
Capacidad teórica de extendido	650 t/h

Tolva de material	
Capacidad	6,0 m ³
Altura de descarga (centro/exterio)	555mm/560mm
Ancho de la tolva, interno	3292 mm

Tracción	
Velocidad max. de pavimentacion	30 m/min
Velocidad de transporte	4 km/h

Motor	
Fabricante/Modelo	Cummins QSB 6.7 -C173
Potencia nominal, SAE J1995	110 kW (150 hp) @2.200 rpm Control rpm continuamente variable
Sistema eléctrico	24 V
Capacidad del tanque de combustible	350 l

Bastidor	
Longitud de orugas	2900 mm
Ancho de orugas	320 mm

Alimentador	
Tipo	Dobles travesaños en túnel de alimentación
Ancho	2 x 655mm
Control del alimentador	Automático mediante paletas

Sinfin	
Diámetro del sinfin	380 mm
Control del sinfin	Mediante sensores ultrasónicos

Localice a su distribuidor local en www.atlascopco.es

Nos reservamos el derecho a cambiar las especificaciones sin previo aviso. Las máquinas en las fotos que ilustran este folleto pueden contener artículos opcionales. Esta información es meramente descriptiva y no está garantizada.

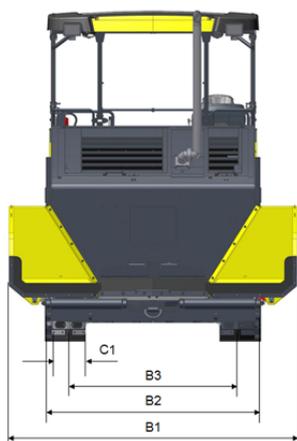
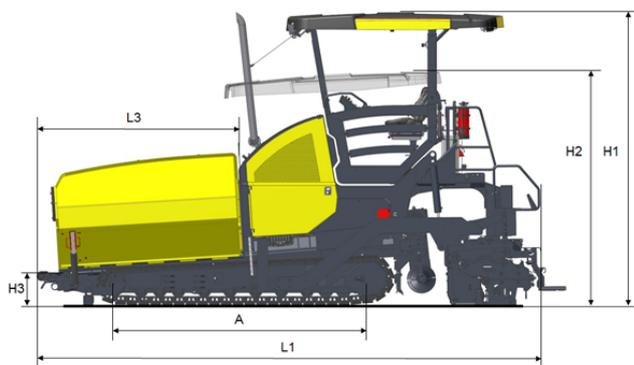
rce_f2500c_es-20140709.151547.pdf 2014-07-09 15:15

Dynapac F2500C

Extendedoras de orugas

Atlas Copco

Datos técnicos



Dimensiones	
A. Distancia entre ejes	2900 mm
B1. Ancho, max.	3400 mm
B2. Ancho, estandar	2550 mm
B3. Ancho, al centro de las orugas	1992 mm
C1. Ancho de las orugas	320 mm
H1. Altura, max.	3900 mm
H2. Altura, transporte	3100 mm
H3. Altura	492 mm
L1. Longitud	6145 mm
L3. Longitud de la tolva	2123 mm

Equipamiento estandar	
Equipamiento	Estandar
Tolva estandar/span>	■
Control independiente del túnel de alimentación	■
Ajuste de altura sinfin mecánico	■
Bloqueo del brazo de la regla mecánico	■
Plata forma fija	■
Asientos confortables	■
Conopy fibra de vidrio	■
Luces	■

Localice a su distribuidor local en www.atlascopco.es

Nos reservamos el derecho a cambiar las especificaciones sin previo aviso. Las máquinas en las fotos que ilustran este folleto pueden contener artículos opcionales. Esta información es meramente descriptiva y no está garantizada.

rce_f2500c_es-20140709.151547.pdf 2014-07-09 15:15

DYNAPAC CP 132 PNEUMATIC TIRE ROLLER



SVEDALA



Technical data CP 132

Weights (lbs)

Shipping weight	26,680
Operating weight:	
- without ballast	9,460
- with 2 ballast boxes	13,960
- with 4 ballast boxes	18,455
- with 6 ballast boxes	22,930
- with 8 ballast boxes	27,560

Traction

Transmission	Hydrostatic, direct drive motors at rear tires
Speeds low/high (mph)	6.2/12.4
Gradeability (theoretical) (%)	31

Compaction

Rolling width (inches)	69
Tire overlap (inches)	0.47
Wheel loads (lbs):	
- without ballast	1,050
- with 2 ballast boxes	1,550
- with 4 ballast boxes	2,050
- with 6 ballast boxes	2,550
- with 8 ballast boxes	3,050
Tire type (ply)	7.50 x 15 ; 14 ply smooth tread with inner tube
Number of tires	5 front, 4 rear
Wheel oscillation (°)	±3 up & down
Water spray system:	
- type	Pressurized, electric pump
- tank capacity (gals)	132
- spray nozzle	one per tire

Brakes

Service:	Hydrostatic braking on rear drive wheels.
Parking/Secondary:	Spring - applied on rear drive wheels.

Engine

Model	Cummins 4BT 3.9
Type	Watercooled Turbo Diesel
Rated power, SAE, @ 2200 rpm (hp)	100
Fuel tank capacity (gals)	37
Electrical system (volt)	12, DC negative ground

Standard Equipment

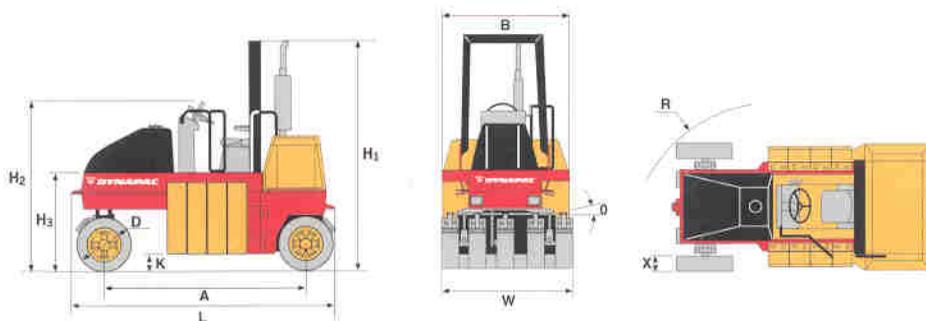
ROPS (incl. seat belt), Air cleaner service indicator, Backup alarm, Brake warning light, Button start, Engine oil pressure light, Engine water temperature gauge, Fuel gauge, Hydraulic oil temperature gauge, Horn, Hourmeter, Hydraulic oil level indicator, Instrument cover, Lifting eyes, Main battery switch, Neutral start switch, Operator seat with arm rest, Pressurized sprinkler system, Dual scrapers with cocoa mats, Tires (14 ply), Tool box, Vandalism protection

Optional Equipment

Sprinkler backup system, Traffic lights, Working lights, Tachometer, Water system timer, Spare wheel assy. incl. mounting bracket, Spare wheel assembly (loose), Slow Moving Vehicle sign (SMV), Rotating beacon

Dimensions (inches)

A	109
B	69
D	30
H ₁	125
H ₂	90
H ₃	53
K	9.1
L	141
O	±3 degrees
R	220
W	69
X	8.5



SVEDALA



Svedala Compaction Equipment AB

Box 504, SE-371 23 Karlskrona, Sweden, Phone: +46 455 30 60 00, Fax: +46 455 30 60 30

Svedala Industries, Inc./Dynapac Compaction and Paving

P.O. Box 615, Schertz, TX 78154, USA, Phone: +1 210 474 5770, Fax: +1 210 474 5750

4050 B, Sladeview Crescent Mississauga, Ontario, L5L 5Y5, Canada, Phone: +1 905 607 3330, Fax: +1 905 607 3332

Svedala Group Companies serve markets in Australia, Austria, Belgium, Brazil, Canada, Chile, China, The Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Ghana, Great Britain, Hong Kong, Hungary, India, Italy, Japan, Malaysia, Mexico, The Netherlands, New Zealand, Norway, Peru, Poland, Russia, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, United Arab Emirates, USA and Vietnam, while authorised agents and distributors cover virtually every other market in the world.

We reserve the right to change specifications without notice.

DD-90 & DD-90HF Vibratory Asphalt Compactors



Machines shown with optional equipment.

A Pair of Eleven Ton Compactors

The Ingersoll-Rand DD-90 and DD-90HF vibratory asphalt compactors have 66 inch (1675 mm) wide drums and provide high performance for highway and other large paving projects. The DD-90 has a frequency of 2,500 vpm (41.7 Hz) and a nominal capacity up to 250 tons (227 metric tonnes) of HMA per hour. The DD-90HF, with a frequency of 3,800 vpm (63.3 Hz), has a nominal capacity up to 325 tons (290 metric tonnes) of HMA per hour. And with operating weights of nearly 11 tons (9.8 metric tonnes), the DD-90 and DD-90HF compactors meet all state D.O.T. static rolling requirements.

Key Features

- Dual frequency vibration systems of 2,500 / 1,850 vpm (41.7 / 30.8 Hz) on the DD-90 and 3,800 / 2,850 vpm (63.3 / 47.5 Hz) on the DD-90HF match machine performance to production requirements
- Eight amplitude settings achieve required compaction throughout deep lifts and/or stiffer mix designs
- Five-position rotating operator's station with an adjustable seat provides a smooth ride and comfortable operating environment
- Two complete, independent water systems include triple water filtration, four water pumps, four spray bars, and variable waterflow
- Eccentric rotation automatically matches direction of travel, improving smoothness
- Patented Impact Spacing Meter provides a visual reference for speed control to maintain proper impact spacing, resulting in consistent smoothness
- Exclusive machined drums with chamfered, radiused drum edges minimize drum edge marking and facilitate finish rolling

DD-90 & DD-90HF Vibratory Asphalt Compactors

Specifications

STANDARD FEATURES

- ROPS / FOPS with seat belt
- Superior drum spray system to maintain maximum productivity
 - Variable waterflow control to conserve water
 - Independent primary and secondary spray systems (each with separate water pumps, water filters, distribution lines, and spray bars with hand-serviceable nozzles)
 - Water tank level LED indicators
- Unobstructed engine access through swing-up hood and removeable side panels
- Vibration-isolated operator platform

OPTIONAL EQUIPMENT

- Air precleaner
- Back-up alarm
- Cocoa mats
- Edge compactor
- HID night operating lights
- Hydraulic oil temperature gauge
- Infrared pavement temperature sensor
- Inside wipers scraper kit
- Operator platform spray shield
- Outside urethane wipers
- Special paint
- Speed limiter
- Speedometer / tachometer
- Speedometer / rpm meter
- Strobe light
- Turn signals and flashers
- Work lights

MODEL	DD-90	DD-90HF
MACHINE WEIGHTS (W/ ROPS / FOPS)		
Operating Weight – lb (kg)	21,820 (9895)	21,705 (9845)
Static Weight @ Front Drum – lb (kg)	11,370 (5155)	11,280 (5115)
Static Weight @ Rear Drum – lb (kg)	10,450 (4740)	10,425 (4730)
Shipping Weight – lb (kg)	20,075 (9105)	20,075 (9105)
MACHINE DIMENSIONS		
Overall Length – in (mm)	200.2 (5085)	200.2 (5085)
Overall Width – in (mm)	75.2 (1910)	75.2 (1910)
Overall Height (top of steering wheel) – in (mm)	87 (2210)	87 (2210)
Overall Height (top of ROPS / FOPS) – in (mm)	112 (2845)	112 (2845)
Drum Base – in (mm)	126 (3200)	126 (3200)
Curb Clearance – in (mm)	17 (430)	17 (430)
Side Clearance – in (mm)	4.5 (115)	4.5 (115)
Inside Turning Radius (to drum edge) – in (mm)	140 (3560)	140 (3560)
DRUM		
Width – in (mm)	66 (1675)	66 (1675)
Diameter – in (mm)	48 (1220)	48 (1220)
Shell Thickness (nominal) – in (mm)	0.75 (19)	0.75 (19)
Finish	Machined surface; chamfered & radiused edges	
VIBRATION		
Frequency – vpm (Hz)	2,500 / 1,850 (41.7 / 30.8)	3,800 / 2,850 (63.3 / 47.5)
Amplitude – in (mm)	0.016 – 0.040 (0.41 – 1.02)	0.019 – 0.025 (0.48 – 0.64)
Centrifugal Force Range – lb (kN)	5,840 – 26,000 (26.0 – 115.6)	16,030 – 38,430 (71.3 – 171.0)
Amplitude Settings	8	8
PROPULSION		
Type	Closed-loop hydrostatic, parallel circuit to both drums	
Drum Drive	Heavy-duty radial piston LSHT motors	
Travel Speed – mph (km/h)	0 – 7.4 (0 – 11.8)	0 – 8.7 (0 – 14.0)
ENGINE		
Make & Model	Cummins B3.9-C	
Engine Type	Turbocharged 4-cylinder	
Rated Power @ 2,200 rpm – hp (kW)	110 (82)	110 (82)
Electrical	12 V DC, negative ground; 95 A alternator	
Battery	1 absorbed electrolytic, 800 CCA	
BRAKES		
Service	Dynamic hydrostatic through propulsion system	
Parking / Secondary	SAHR on front-drum & rear-drum drive motors	
WATER SYSTEM		
Type	Pressure spray drum wetting system with LDPE water tanks	
Pumps	Diaphragm water pumps, primary & secondary for each drum	
Spray Bars	Primary & secondary spray bars for each drum	
Nozzles	Hand-serviceable fan spray nozzles; 7 main, 6 auxiliary per spray bar	
Filtration	Basket strainer each tank, water filter each pump, fine filter each nozzle	
Drum Wipers	Rubber wiper for each drum	
Water Tank Capacity – gal (L)	260 (984)	260 (984)
MISCELLANEOUS		
Articulation Angle (center pivot steering)	+ / - 40°	+ / - 40°
Oscillation Angle	+ / - 10°	+ / - 10°
Fuel Capacity – gal (L)	45 (170)	45 (170)
Hydraulic Oil Capacity – gal (L)	35 (133)	35 (133)
Gradeability (theoretical)	24.8%	25.0%

Product improvement is a continuing goal at Ingersoll-Rand. Designs and specifications are subject to change without notice or obligation.

