



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



ANALISIS DE FIRMES BITUMINOSOS SOSTENIBLES CON ARIDOS ARTIFICIALES Y ARIDOS RECICLADOS

Trabajo realizado por:
DAVID GOMEZ CARRASCAL

Dirigido:
ANGEL VEGA ZAMANILLO

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, septiembre de 2022

TRABAJO FIN DE GRADO

RESUMEN

Desde la segunda mitad del siglo pasado hasta hoy, ha existido un crecimiento sin precedentes de la economía a nivel mundial, con sus épocas punta y valle, con todo lo que ello trae consigo: cambio climático, deforestación, contaminación y muchas otras que vinculan directamente la supervivencia de las generaciones futuras.

En este contexto, una de las razones que han impulsado a hacer este estudio es la innegable repercusión que hoy en día tiene para las personas, el concepto de sostenibilidad, en todas sus esferas, tanto en el ámbito académico como en el científico-técnico, a través de la búsqueda de alternativas que nos permitan compatibilizar el crecimiento con un desarrollo más sostenible. En este sentido, la implementación de nuevos procesos, el estudio de nuevos materiales o sobre todo la reutilización de los mismos, se hace más que necesario, indispensable.

El presente trabajo quiere aportar una mejora del medio ambiente y un progreso en unas carreteras más verdes, al realizarse un estudio analítico de algunas secciones de firme tipo que nos indica la norma, comparándose el comportamiento de las mezclas tradicionales con otras mezclas en las que se han reutilizado otros materiales procedentes de reciclado, residuos o aditivos que mejoran algunas características mecánicas o reológicas.

Los datos de partida de las mezclas analizadas han sido facilitados por el Grupo Caminos Santander del E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

Con la ayuda del programa Alize, obtenemos las tensiones y deformaciones que se ven sometidas todas las secciones de firme analizadas.

Posteriormente con las expresiones matemáticas de las leyes de fatiga facilitadas se han obtenido el número N de aplicaciones de un eje tipo de 13tn que puede soportar el material estudiado antes de llegar al agotamiento estructural.

Dicha comparación concluye que para los tipos de tráfico más pesado T00, T0 y T1, las mezclas analizadas no mejoran la durabilidad de la sección, pero su reducción de aprox. 12-15%, se puede considerar aceptable al considerarse el valor ecológico que conlleva no llevarse material a vertedero encontrándolo una nueva utilidad.

Para categorías de tráfico pesado T2, T31, T32 y T41, todas las mezclas analizadas mejoran la durabilidad de las mezclas tradicionales.

Para categoría de tráfico pesado T42, los datos obtenidos nos indican que en firmes con una sola capa de pavimento, capa de rodadura, no es muy recomendable el empleo de estos materiales; en todo caso se pueden disponer en zonas peatonales, pero no para el paso de vehículos pesados. Esta sección de firme tiene una base granular sin tratar de zahorra, a la cual no se le añade un riego de adherencia y por lo tanto el número de ejes tipo resistido es muy bajo.

Índice

RESUMEN.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Justificación del T.F.G.....	4
1.2 Objetivo del T.F.G.	9
2 ESTADO DEL ARTE	10
2.1 Instrucción de carreteras I.C.6.1 – “Secciones de firmes”	10
2.2 Pavimentos bituminosos.....	18
2.2.1. Áridos	18
2.2.2. Ligantes bituminosos	20
2.2.3 Mezclas bituminosas convencionales	22
2.2.4 Mezclas bituminosas recicladas (sostenibles)	28
2.3 Método de dimensionamiento de Kraemer	30
3 MATERIALES.....	36
3.1 Áridos naturales	36
3.2 Ligantes utilizados	36
3.3 Materiales y aditivos.....	37
3.3.1 Sal común	37
3.3.2 Escorias negras	37
3.3.3 Cenizas de central térmica.....	38
3.3.4 Plástico de Ecoembes	38
3.3.5 Plástico procedente del pelado de cables de cobre	39
3.3.6 Material de fresado	39
3.3.7 Cera sintética	40
3.3.8 Lana de acero.....	40
3.3.9 Caucho.....	41
4 METODOLOGIA.....	42
4.1 Secciones de firme analizadas	42
4.2 Parámetros y Leyes de fatiga utilizadas para el cálculo matemático	45
4.3 Mezclas bituminosas analizadas	46
4.3.1 En capa de superficie.....	46
4.3.2 En otras capas del firme.....	51
4.4. Programa Alize v 1.3.0.....	51
5. RESULTADOS	54
6. CONCLUSIONES	75
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	76

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del T.F.G.

En un mundo en el que la competencia y la demanda por unos recursos finitos y/o escasos seguirá creciendo, y en el que la presión por los recursos acentúa la degradación y la fragilidad del medio ambiente, mejorar el aprovechamiento de estos puede beneficiar no sólo el crecimiento y eficiencia de sus economías, sino que asegura la preservación de los mismos a las generaciones que están por venir.

El vertiginoso avance de la humanidad durante la segunda mitad del siglo XX, tanto en la esfera económica, como en la científica y técnica, plantea sin duda un escenario con grandes desafíos en lo relativo a la búsqueda de nuevas técnicas y modelos que permitan encontrar el equilibrio entre crecimiento y sostenibilidad, lo que ha venido a bien denominarse como “Desarrollo Sostenible”.

Sus antecedentes se remontan a la conferencia de las Naciones Unidas celebrada en Estocolmo en 1972 que marcó el inicio del movimiento ambiental mundial y reconoció la interacción entre las dimensiones económica, social y ambiental señalando la relación del desarrollo para la supervivencia de la especie humana y generando un proceso de toma de conciencia a escala mundial, que puso de relieve la estrecha relación existente entre el desarrollo económico y el medio ambiente.

Sin duda este fue un primer gran paso; sin embargo, no es hasta 1987 cuando con la publicación del “**Informe Brundtland**”, con sello de la ONU, elaborado por la Comisión Mundial sobre Ambiente, cuando se define realmente el concepto de desarrollo sostenible.

“La esencia del desarrollo sostenible propone buscar un adecuado equilibrio entre el desarrollo económico y la protección del medio ambiente, de tal forma que, se satisfagan las necesidades de las generaciones siguientes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Menendez Sebastian, 2006)

Ante este escenario, todos los agentes tanto públicos como privados, se vieron obligados a converger hacia un objetivo global que les condujera al tan anhelado desarrollo, pero de sustentado en un modelo más sostenible que no repitiese los errores del anterior. Poco a poco, el “desarrollo sostenible” y la protección y cuidado del medio ambiente, son términos que empiezan a articularse tímidamente en el seno de la Unión Europea y de sus Instituciones y, sus políticas que son llevadas a cabo siempre de forma conjunta son fiel respuesta de ello.

Con el ánimo de proseguir con estos objetivos se suma la “Cumbre de la tierra” (Rio de Janeiro en 1992), celebrada por La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, en ella surgió “La Agenda 21” que vino a convertirse en marco de referencia mundial para orientar el proceso de desarrollo haciéndolo más acorde con los principios de sostenibilidad.

Es innegable que, aunque se empieza a avanzar tímidamente en este sentido, es en el presente siglo, donde se deben resolver los grandes desafíos, en torno al ya citado “*desarrollo sostenible*”; y todo lo que ello implica para nuestra sociedad.

Términos como la contaminación de residuos, la escasez de recursos naturales y, el cambio climático entre otros y, la respuesta que cómo sociedad debemos dar a éstos adquiere el protagonismo central en el discurso, y se posicionan de esta forma como parte ineludible de la toma de decisiones y de las directrices a seguir.

Así pues, en Junio de 2001, con la celebración del Consejo Europeo de Gotemburgo, la Unión Europea incorpora en sus políticas oficialmente y de forma decidida el concepto de “*desarrollo sostenible*” al definir éste, como uno de los pilares de la denominada “*Estrategia Comunitaria Para el Desarrollo Sostenible*”, y su integración definitiva en las políticas económicas y sociales (**Menendez Sebastian, 2006**), todos estos objetivos se vieron refrendados en septiembre de 2015 con la proclamación de “La Agenda 2030” para el Desarrollo Sostenible (ODS)

Todo ello conlleva el que los Estados Miembro, hagan suyo el principio de sostenibilidad en sincronía con la visión estratégica de la Unión Europea, la cual se caracteriza por su enfoque integrador de las esferas: económica, social, ambiental, al mismo tiempo que garantiza la prosperidad económica, asegura la protección y la defensa del medio ambiente y evita la degradación del capital natural.

Así pues, el Desarrollo Sostenible pasa a formar parte del discurso político comunitario y, sumado al principio de integración, instaura al medio ambiente como protagonista central de la política europea.

“Las exigencias de la protección del medio ambiente deberán integrarse en la definición y en la realización de las políticas y acciones de la Unión, en particular con objeto de fomentar un desarrollo sostenible” (Tratado de La Unión Europea, 1992)

Son importantes en este contexto, los nuevos estudios que en materia de reutilización de residuos y de materiales ponen de manifiesto y evocan un nuevo concepto: la “*Economía Circular*”, definida ésta como un método que va más allá de un cambio revolucionario en el modelo de desarrollo o de la simple búsqueda de una producción más sostenible, sino también, que promueve un consumo más responsable; de esta forma, termina por involucrar a través de sus principios a todos los agentes del circuito económico, públicos y privados, convirtiendo la economía circular en la evolución lógica del desarrollo sostenible, su presente y su futuro.

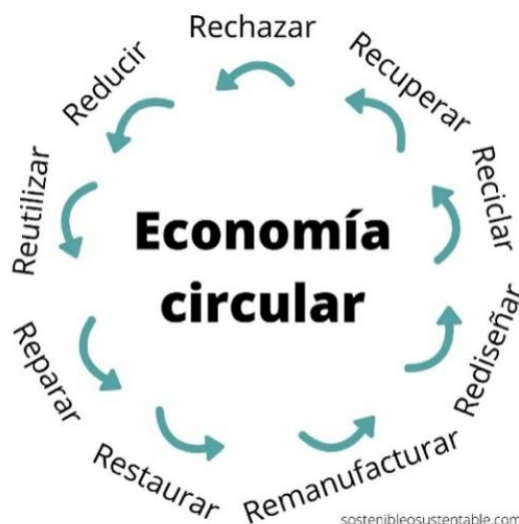


Figura 1.1. Modelo de Economía Circular

La “Economía Circular” como se puede observar en la figura 1.1, busca la optimización de los recursos a través de la recirculación de los productos y su reincorporación a nuevos ciclos sin perder valor, evitando así que se conviertan en residuos. Sus principales pilares son:

- la eliminación de residuos.
- la reducción de la contaminación.
- el mantenimiento de los productos.
- la regeneración de sistemas naturales.

Este es un cambio significativo en el modelo de producción, desde la revolución Industrial, donde la economía se ha desarrollado bajo un patrón de crecimiento sustentado en la secuencia *-tomar-fabricar-consumir y eliminar-*, modelo lineal este basado en las premisas de la abundancia, disponibilidad, fácil obtención y eliminación barata de los recursos, premisas que por supuesto hoy en día resultan del todo obsoletas.

El cambio en el paradigma hasta ahora conocido tendrá como contrapartida que seamos no sólo más eficientes en los procesos productivos, sino también que seamos menos dependientes de los recursos o materias primas cada vez más escasas, o en su defecto más contaminantes.

Cambiar el modelo lineal por uno circular, que devuelva lo que consideramos residuos a la categoría de materia prima y reutilizarlos hasta que realmente lo sean, es la esencia de esta nueva estrategia. Agotar la verdadera vida útil de los materiales reducirá el abuso que se ha hecho hasta ahora de las materias primas y reducirá el nivel de residuos que se generan, un problema altamente preocupante y que plantea nuevos retos que asumir en las próximas décadas.

La economía circular se convirtió así en una estrategia europea central, que dentro de los objetivos de Horizonte 2020 y con la mira puesta en el desarrollo sostenible, dirigió el cambio hacia un nuevo modelo económico que reintrodujera nuevos materiales y terminara por convertir en pionera a la Unión en materia de reutilización de residuos y protección del medio ambiente.

Con estos objetivos y otras acciones que lo complementarán, La Unión plantea una trayectoria creíble y ambiciosa para una mejor gestión de los residuos de Europa, con acciones de apoyo que cubren la totalidad del ciclo productivo. Mediante una combinación equilibrada de normativa inteligente y de incentivos a nivel de la Unión Europea ayudará a las empresas y a los consumidores, así como a las autoridades nacionales y locales, a impulsar dicha transformación.

Este cambio en el modelo económico lineal se ha llevado a cabo de forma gradual, y no es hasta diciembre de 2015, cuando a través de un paquete de medidas lanzado por Bruselas, donde “la economía circular” tiene especial relevancia.

Dicho conjunto de medidas incluye acciones a largo plazo, dirigidas a abordar todas las fases del ciclo de vida del producto, desde la producción, su consumo, la gestión de residuos y el mercado de materias primas secundarias.

La reutilización, la reparación y restauración, el reciclaje y la recuperación de energía se convierten en alternativas ambiciosas y que presentan desde luego, grandes retos, pero es la reutilización de materias primas como el plástico, material extremadamente maleable y contaminante, donde se generan los grandes desafíos.

Por ejemplo, en torno al reciclaje y recirculación del plástico, converge por un parte, el gran aumento de su consumo en las últimas décadas, apreciable en la figura 1.2. Y por otro el gran impacto ambiental que en cuanto a contaminación ha generado en nuestro medio ambiente.

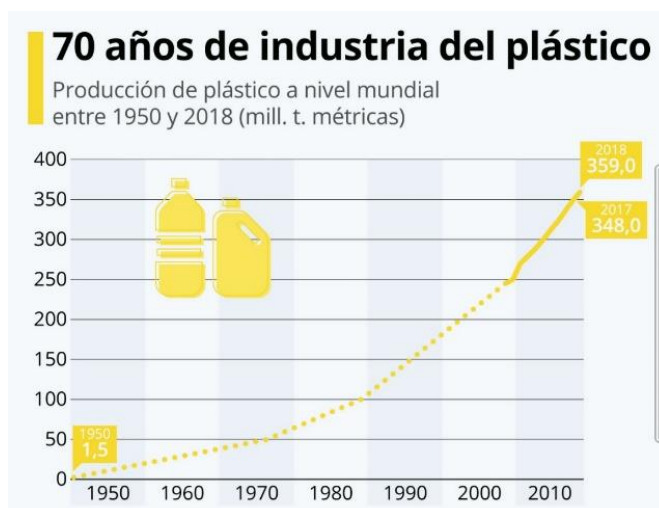


Figura 1.2. Producción de plásticos a nivel mundial, entre 1950 y 2018, en millones de toneladas

Este vertiginoso crecimiento ha obligado a la búsqueda de alternativas sostenibles al respecto llevando a la industria del plástico a dar un paso más allá de la simple reutilización de sus productos para avanzar hacia técnicas y usos más complejos y que involucre a todo tipo de sectores de la economía, ejemplo de ello son los nuevos productos generados a partir de plástico reciclado.

En febrero de 2018, el Consejo europeo aprobó una normativa europea sobre reciclaje y gestión de residuos marcando la ruta a seguir hasta el año 2035.

Los Estados miembros tendrán que cumplir los siguientes objetivos de incrementar la reutilización y el reciclaje de los residuos municipales (tabla 1.1):

	Antes de 2025	Antes de 2030	Antes de 2035
Residuos municipales	55%	60%	65%

Tabla 1.1: Tasa de reutilización de residuos municipales (web: residuos profesionales.com)

Las medidas marcan unas tasas de reutilización y reciclaje de basuras que deben ser alcanzados del 55% en 2025 e ir subiendo hasta el 60% en 2030 y el 65% en 2035.

La norma define objetivos de reciclado para los envases (tabla 1.2):

	Antes de 2025	Antes de 2030
Todos los envases	65%	70%
Plástico	50%	55%
Madera	25%	30%
Metales ferrosos	70%	80%
Aluminio	50%	60%
Cristal	70%	75%
Papel y cartón	75%	85%

Tabla 1.2: Tasa de reciclado de envases (web: residuos profesionales.com)

El paquete de medidas sobre residuos va a dar lugar a un mayor reciclaje de residuos y va a contribuir a la creación de una economía circular. Fomentará el uso de envases reciclables y reutilizables y mejorará el modo en que se gestionan los residuos.

La sostenibilidad medioambiental y la economía circular puede hacerse realidad.

1.2 Objetivo del T.F.G.

El presente trabajo consiste en un estudio analítico de las mezclas bituminosas, en donde se comparan las mezclas tradicionales para secciones de firmes preferentemente en capa de rodadura, tanto flexibles como semiflexibles, con el mismo tipo de mezclas a las cuales se les ha añadido una serie de materiales procedentes de reciclado, residuos o aditivos que mejoran algunas características mecánicas o reológicas.

Los datos de partida de las mezclas con añadido de materiales reciclados han sido facilitados por el Grupo Caminos Santander del E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

Se han comparado las diferentes tensiones y deformaciones, módulos y leyes de fatiga que se producen en cada caso y posteriormente se han calculado el número de ejes tipo que alcanzan hasta la rotura en alguna de sus capas, comparándose y analizándose los resultados obtenidos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Instrucción de carreteras I.C.6.1 – “Secciones de firmes”

Los firmes de carretera se componen por un conjunto de capas superpuestas horizontalmente y de varios centímetros de espesor de diferentes materiales adecuadamente compactados que se apoyan en la explanada y han de poder soportar las cargas del tráfico durante un periodo de varios años sin deterioros que afecten a la seguridad, a la comodidad de los usuarios o a la propia integridad del firme (Figura 2.1).

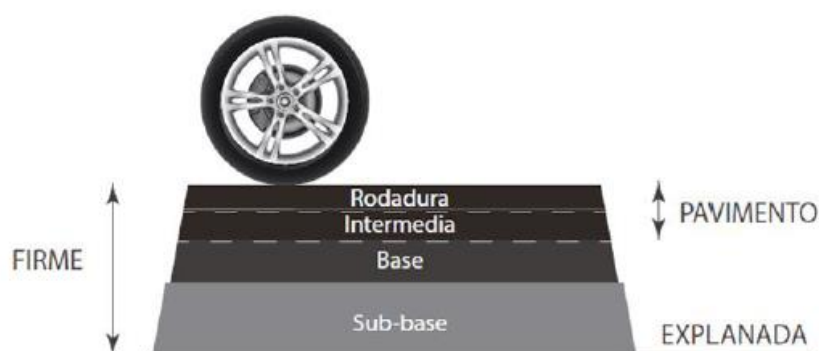


Figura 2.1: Sección tipo de una carretera compuesta por una mezcla bituminosa (autor: Carlos Real)

Las explanadas no pueden resistir por sí solas un tráfico medio

La Norma 6.1 IC “Secciones de firme” (2.003) tiene por objeto establecer los criterios básicos que deben ser considerados en el proyecto de los firmes de carretera de nueva construcción. Para ello acompaña un catálogo de secciones de firmes contrastadas por la experiencia y comprobadas mediante métodos analíticos y empíricos aplicados con la práctica actual.

Dependiendo de la categoría de tráfico pesado y del tipo de explanada se fijan diferentes alternativas de firme (figuras 2.2 y 2.3 de la I.C.6.1).

Las secciones de firme tienen una enumeración. Cada sección se designa por un número de tres o cuatro cifras:

- La primera (si son tres cifras) o las dos primeras (si son cuatro cifras) indican la categoría de tráfico pesado, desde T00 a T42
- La penúltima expresa la categoría de explanada, desde ·1 a E3
- La última hace referencia al tipo de firme, con el siguiente criterio:
 - 1: Mezclas bituminosas sobre capa granular
 - 2: Mezclas bituminosas sobre suelocemento
 - 3: Mezclas bituminosas sobre gravacemento construidas sobre suelocemento
 - 4: Pavimento de hormigón

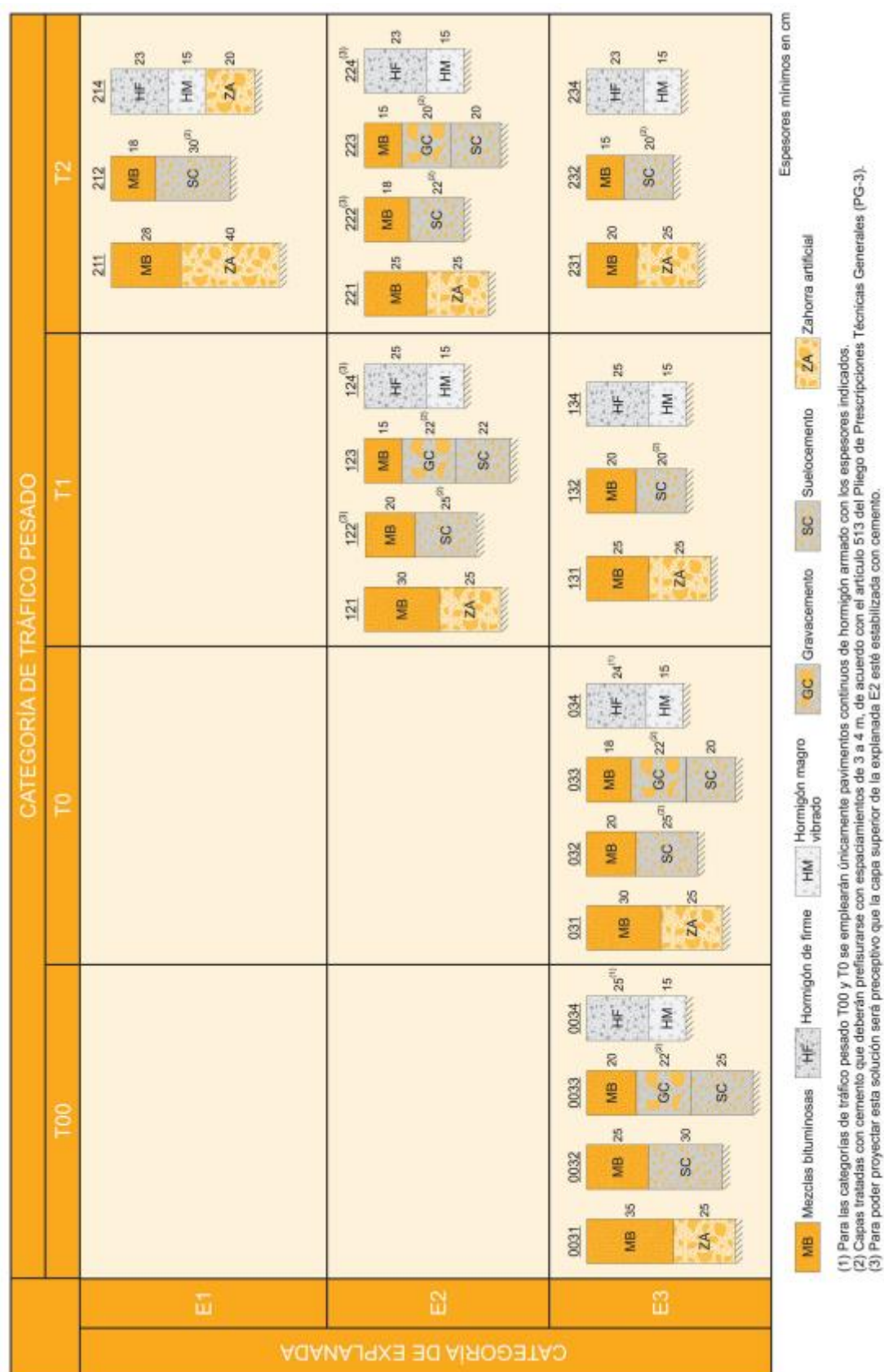


Figura 2.2: Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00, T0, T1 Y T2 (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

CATEGORIA DE TRAFICO PESADO									
	T31		T32	T41	T42				
E1	3111	3112	3114	4111	4112	4114	4211	4212	4214
E2	3121	3122	3124	4121	4122	4124	4221	4222	4224
E3	3131	3132	3134	4131	4132	4134	4231	4232	4234
CATEGORIA DE EXPLANADA					Espesores mínimos en cm				
					MB	Mezclas bituminosas	HF	SC	ZA

vehículos pesados (IMDp) que se prevea en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio. Dicha intensidad se utilizará para establecer la categoría de tráfico pesado.

Para estimar la evolución del tráfico pesado, necesaria para la determinación de la intensidad en el año de puesta en servicio, se podrá adoptar como tasa de crecimiento el valor medio de las obtenidas en los cinco últimos años en la estación de aforo permanente o de control (primaria o secundaria) en el mismo itinerario y más próxima al tramo en estudio.

A los efectos de aplicación de esta norma, se definen ocho categorías de tráfico pesado, según la IMDp que se prevea para el carril de proyecto en el año de puesta en servicio.

La tabla 2.1 presenta las categorías T00 a T2, mientras que las categorías T3 y T4, que se dividen en dos cada una de ellas, aparecen recogidas en la tabla 2.2.

Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T2
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4000	< 4000 ≥ 2000	< 2000 ≥ 800	< 800 ≥ 200

Tabla 2.1: Categorías de tráfico pesado T00 a T2 según IMDp (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Categoría de tráfico pesado	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25

Tabla 2.2: Categorías de tráfico pesado T3 y T4 según IMDp (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

A los efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen tres categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}), obtenido de acuerdo con la NLT-357 «Ensayo de carga con placa», cuyos valores se recogen en la tabla 2.3.

Categoría de explanada	E1	E2	E3
E_{v2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Tabla 2.3: Categorías de explanada según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

La formación de las explanadas de las distintas categorías se recoge en la figura 2.4, dependiendo del tipo de suelo de la explanación o de la obra de tierra subyacente, y de las características y espesores de los materiales disponibles.

Si se justifica adecuadamente, esta norma no excluye en las categorías de tráfico pesado más bajas: T32, T41 y T42), la posibilidad de un dimensionamiento con materiales distintos de los incluidos expresamente en la figura 2.3, ya que determinadas condiciones locales pueden hacer que unidades de obra diferentes a las del catálogo resulten de interés técnico o económico, con mejores resultados desde el punto de vista ambiental o de la seguridad de la circulación vial.

Por esta razón se ha desarrollado la tabla 2.4, en la que se incluyen coeficientes de equivalencia (cociente entre los espesores de dos capas de diferente naturaleza que se supone aportan una capacidad estructural semejante), respecto a las mezclas bituminosas en caliente convencionales, para los casos en los que fuese necesario recurrir a la equivalencia estructural entre diferentes materiales. Excepcionalmente, se podrá recurrir al dimensionamiento analítico, siempre que se disponga de los correspondientes módulos y leyes de fatiga, cuya idoneidad para el caso en estudio debe ser detalladamente justificada, como es el caso de este TFG.

En otros casos se pueden construir firmes con riegos con gravilla tipo bicapa.

Como aspecto muy importante en cualquier circunstancia, en dicha tabla se recogen también limitaciones constructivas, que deben ser tenidas en cuenta tanto en el proyecto como en la construcción

Material	Coefficiente de equivalencia	Ley de fatiga	Prescripciones complementarias
Mezclas bituminosas en caliente (D, S y G).	1	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas discontinuas en caliente (M y F).	1	—	Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas drenantes (PA).	1	—	Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.2.
Mezclas bituminosas abiertas en frío (AF).	1*	—	Sólo se podrán emplear para T4 (T41 y T42). En capa de rodadura se recomienda sellar con un tratamiento superficial.
Mezclas bituminosas de alto módulo (MAM).	1,25	$\epsilon_r = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	Ver apartados 6.2.1.1 y 6.2.1.3.
Pavimento de hormigón.	—	—	Ver apartado 6.2.3.
Materiales tratados con cemento.	—	Gravacemento $\frac{\sigma_r}{R_F} = 1 - 0,065 \cdot \log N$	Espesor mínimo: 20 cm. Espesor máximo: 25 cm para gravacemento. 30 cm para suelocemento. Ver apartado 6.2.2.
		Suelocemento $\frac{\sigma_r}{R_F} = 1 - 0,080 \cdot \log N$	
Gravaemulsión.	0,75	Ley específica	Espesor de capa: Para T00 a T1: No admisible. Para T2 a T4: 6 a 12 cm.
Gravaescoria.	Material equivalente a la gravacemento, a la que podrá sustituir en algún tipo de soluciones.		Espesor mínimo: 15 cm. Espesor máximo: 30 cm.
Zahorra artificial.	0,25	$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	Espesor mínimo: 20 cm (15 cm en arcenes y en secciones 3221 y 4211). Espesor máximo: 30 cm.

Tabla 2.4: Características de los materiales de firme (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Los espesores de cada capa vendrán determinados por los valores dados en la tabla 2.5. Salvo justificación en contrario las secciones de firme se proyectarán con el menor número de capas posible compatible con los valores de dicha tabla, al objeto de proporcionar una mayor continuidad estructural del firme. En las secciones en las que haya más de una capa de mezcla bituminosa el espesor de la capa inferior será mayor o igual al espesor de las superiores.

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado		
		T00 a T1	T2 y T3 I	T32 y T4 (T41 y T42)
Rodadura.	PA	4		
	M	3	2-3	
	F			
	D y S		6-5	5
Intermedia.	D y S	5-10 **		
Base.	S y G	7-15		
	MAM	7-13		

* Ver definiciones en tabla 5 o artículos 542 y 543 del PG-3.

** Salvo en arcenes, para los que se seguirá lo indicado en el apartado 7.

Tabla 2.5: Espesor de capas de mezclas bituminosas en caliente (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Al utilizar una base AC22 base S MAM la instrucción nos permite una reducción del 20% del espesor en dicha capa.

El artículo 542 del PG3 indica el tipo de mezcla bituminosa a emplear en función del tipo y del espesor de la capa del firme (Tabla 2.6)

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	ESPESOR (cm)
	DENOMINACIÓN. NORMA UNE-EN 13108-1(*)	
RODADURA	AC16 surf D AC16 surf S	4 – 5
	AC22 surf D AC22 surf S	> 5
INTERMEDIA	AC22 bin D AC22 bin S AC32 bin S AC 22 bin S MAM (**)	5-10
BASE	AC32 base S AC22 base G AC32 base G AC 22 base S MAM (***)	7-15
ARCENES(****)	AC16 surf D	4-6

(*) 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 seis centímetros (6 cm).

(***) Espesor máximo 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 2.6: Tipo de mezcla en función del tipo y espesor de la capa (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Igualmente, la norma fija la dotación mínima de ligante hidrocarbonado de la mezcla bituminosa según el tipo de mezcla y de capa (Tabla 2.7).

La dotación mínima se fija en % en masa sobre el total de la mezcla bituminosa, incluido el polvo mineral.

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	DOTACIÓN MÍNIMA (%)
RODADURA	densa y semidensa	4,50
INTERMEDIA	densa y semidensa	4,00
	alto módulo	4,50
BASE	semidensa y gruesa	4,00
	alto módulo	4,75

Tabla 2.7: Dotación mínima de ligante según el tipo de mezcla y de capa (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Para la elección del tipo de ligante bituminoso, así como para la relación entre su dosificación en masa y la del polvo mineral, se tendrá en cuenta la zona térmica estival definida en la figura 2.5.

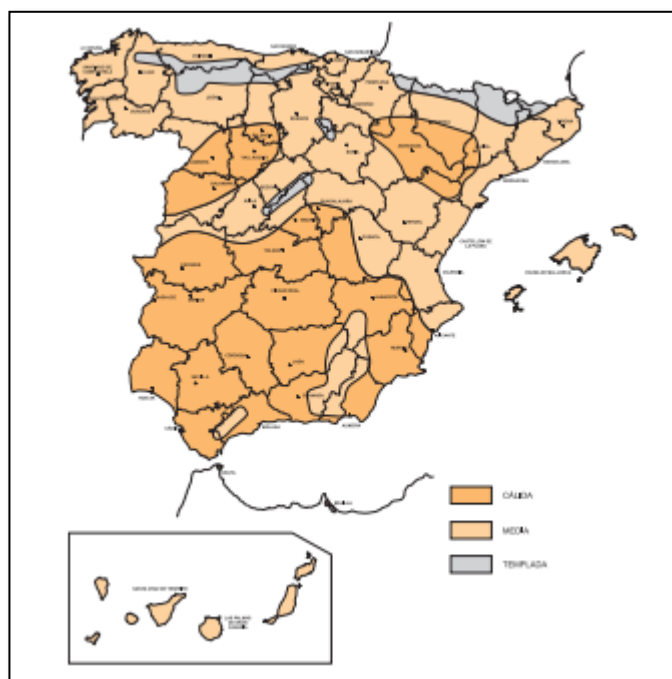


Figura 2.5: Zonas térmicas estivales (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

2.2 Pavimentos bituminosos

2.2.1. Áridos

2.2.1.1 Tipos de áridos

Los áridos pueden ser naturales, artificiales y reciclados, dependiendo del proceso y procedencia para su obtención.

Áridos naturales: de origen mineral que únicamente ha sido sometido a procesos mecánicos.

Áridos artificiales: de origen mineral resultante de un proceso industrial que comprende una alteración térmica u otras.

Áridos reciclados: árido resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción. Por ejemplo:

- RCDs: con áridos procedentes de los residuos de construcción y demolición, como los áridos procedentes del machacado de escombros de hormigón.
- RAP fresados: son áridos que proceden del fresado de pavimentos asfálticos que han sido demolidos o rehabilitados.

Hay otra clasificación importante de cara a este estudio que es por su tamaño:

Árido grueso constituido por las fracciones de un tamaño apreciable, por encima de 2mm

Árido fino, partículas inferiores a 2mm, que carece de materia orgánica y con reducida, incluso nula, plasticidad.

Filler o polvo mineral, es la fracción de árido que pasa por el tamiz de 63μm, desempeñando un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas por su elevada superficie específica.

2.2.1.2 Propiedades fundamentales de los áridos son:

La **granulometría** es una característica física fundamental de cualquier conjunto compactado de partículas, pues influye de forma importante en su resistencia mecánica.

El tamaño máximo de los áridos en una determinada aplicación viene normalmente limitada por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida, a la trabajabilidad del material, a una eventual segregación por tamaños, etc.

Por otra parte, la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su proporción y su plasticidad. En las mezclas bituminosas tiene una especial influencia la fracción que pasa por el tamiz 63μm del tamiz #200ASTM), llamada polvo mineral o

filler, pues muchas características de la mezcla dependen de la acción mutua entre éste y el ligante.

El rozamiento interno y la cohesión produce la resistencia a la deformación, y por lo tanto la capacidad de soporte de una capa de firme. El rozamiento interno aumenta si las partículas son angulosas (árido triturado) y de textura superficial áspera. También influyen de forma importante la granulometría del árido y la proporción de huecos en el material compactado. A unas mayores densidades corresponden generalmente unas mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor muy importante.

La forma y angulosidad de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente a la resistencia del esqueleto mineral del árido. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en redondeadas, cúbicas, lajas y agujas. Las lajas son partículas alargadas con una dimensión muy inferior a las otras dos; las agujas son partículas alargadas con una dimensión muy superior a las dos restantes. Las lajas y las agujas pueden romperse con facilidad durante la compactación o bajo la acción de tráfico, modificando con ello la granulometría del árido y descubriéndose en su caso una superficie no envuelta por el ligante. En consecuencia, deben imponerse limitaciones a la proporción de partículas con forma defectuosa; en términos generales, en una fracción de árido no se debe sobrepasar del orden del 30 por 100 en masa de lajas y agujas. Los áridos cúbicos son los más adecuados.

La resistencia a la fragmentación del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una capa de firme. La evaluación de dichas resistencias se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio. Los más usuales son el **ensayo de Los Ángeles** y el **ensayo de friabilidad**. El primero de ellos es el más conocido y el habitualmente recogido en las especificaciones, a veces se le denomina de desgaste, es realmente un ensayo de fragmentación.

La **limpieza de los áridos** es fundamental, eso significa que la superficie de las partículas ha de estar exenta de polvo, suciedad, arcilla u otras materias extraídas.

La **adhesividad** es un fenómeno complejo en el cual intervienen factores físicos (suciedad del árido, textura y porosidad, viscosidad y tensión superficial del ligante, espesor de la película de la ligante, etc.) y químicos (relativos a la naturaleza del ligante y del árido). Si los áridos están absolutamente secos y limpios, se dejan mojar fácilmente por los ligantes hidrocarbonados. Sin embargo, con algo de humedad, sus superficies presentan una polaridad cuyo signo depende de la naturaleza de los áridos que, atendiendo a este criterio, se clasifican en ácidos y básicos.

Un método simple de evaluación de la adhesividad entre el árido grueso y el ligante consiste en apreciar visualmente si unas partículas de árido envueltas con betún se mantienen cubiertas por él tras un periodo de **inmersión en agua**. Para los tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla se emplea específicamente un ensayo denominado de la **placa de Vialt**.

La **resistencia al pulimento** de la partículas de un árido, es decir, la resistencia a perder la aspereza de su textura superficial, tiene una gran importancia desde el punto de vista de resistencia al deslizamiento si dichas partículas van a ser empleadas en las capas de rodadura de naturaleza bituminosa o en determinados acabados de los pavimentos de

hormigón. Por ello, se han desarrollado unos **ensayos de pulimento acelerado**, entre los que hay que destacar el del Road Research Laboratory (RRL) del Reino Unido.

2.2.2. Ligantes bituminosos

2.2.2.1 Tipos de ligantes

Los ligantes y conglomerantes son materiales que se caracterizan por tener unas propiedades aglomerantes que se pone de manifiesto, mediante procesos de diferente naturaleza, al entrar en contacto con las partículas minerales de los suelos o de los áridos. Son los materiales que aportan cohesión a las capas de los firmes, complementando en su caso el rozamiento interno que proporciona el esqueleto mineral. Existen dos grandes grupos, por un lado, los **ligantes hidrocarbonados**, y por otro, las cales aéreas y los conglomerantes hidráulicos y puzolánicos.

Los ligantes hidrocarbonados son materiales aglomerantes, sólidos o líquidos relativamente viscosos a temperatura ambiente, constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos. Los empleados en carreteras son fundamentalmente los **betunes asfálticos** y sus derivados (principalmente, las **emulsiones bituminosas**).

Los betunes asfálticos se suelen obtener como subproducto de la destilación del crudo en las refinerías de petróleo. Sin embargo, en algunas instalaciones se refinan sólo los crudos asfálticos, siendo, por tanto, el betún asfáltico no un subproducto, sino el producto final fundamental.

Los betunes asfálticos suelen denominarse también **betunes de penetración**. Este término se refiere a la penetración de una aguja calibrada a una temperatura normalizada que sirve para clasificarlos de una manera simple. Las especificaciones españolas definen los betunes por dos números que indican el intervalo en el cual debe estar comprendido el valor de dicha penetración en décimas de milímetros (B13/22, B40/50, B60/70, B80/100, B150/200 Y B 200/300). Cuanto menor es la penetración, más duro y consistente es el betún.

Los **betunes fluidificados** son unos derivados de los betunes asfálticos que se obtienen mediante su disolución en un aceite o fluidificante, teniendo, por tanto, una viscosidad reducida. El fluidificante no es en general más que un aditivo que se elimina posteriormente por evaporación y que sirve para facilitar la puesta en obra, quedando finalmente sólo el betún puro. Se utilizan dos tipos de betunes fluidificados: los de curado rápido (RC) y los de curado medio (MC), los primeros son betunes fluidificados con naftas o gasolinas muy volátiles y los segundos son betunes fluidificados con petróleos o queroseno.

Con objetivo de obviar el calentamiento del betún y poder trabajar también en tiempo lluvioso y frío sin los inconvenientes de los betunes fluidificados, se recurre a las **emulsiones bituminosas**, que son la base actual de la denominada tecnología en frío en la construcción de carreteras. Las emulsiones bituminosas son unas dispersiones coloidales de betún asfáltico puro o algo fluidificado en agua. Por tanto, son productos

líquidos a temperatura ambiente son una viscosidad tan reducida que no suele ser necesario ningún calentamiento.

Las emulsiones bituminosas empleadas en carreteras pueden ser básicas o **aniónicas** y ácidas o **catiónicas**, según la polaridad que el emulgente proporcione a las partículas de betún. Las emulsiones aniónicas tienen buena adherencia con los áridos calizos (básicos en general) y las catiónicas son los silíceos (ácidos en general), aunque también con la mayoría de los calizos.

Con los betunes asfálticos y las emulsiones bituminosas se puede atender la mayor parte de las necesidades que pueden surgir en carreteras y aeropuertos. Existen, sin embargo, situaciones en las que el ligante hidrocarbonado debe ofrecer unas mejores características que los ligantes convencionales: baja susceptibilidad térmica, alta resistencia a las deformaciones plásticas, durabilidad, etc.

Tanto a los betunes como a las emulsiones bituminosas se les puede incorporar aditivos que modifican sus características reológicas, es decir, que mejoran su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura y de velocidad de aplicación de cargas, dando lugar a los **betunes modificados**.

Es creciente el empleo de betunes modificados con polímeros elastotermoplásticos en aplicaciones tales como mezclas bituminosas porosas o drenantes, morteros bituminosos y microaglomerado, tratamiento contra la propagación de las fisuras, etc; especialmente en las autopistas y en otras vías importantes.

Los betunes modificados con polímeros son ligantes hidrocarbonados cuyas propiedades reológicas han sido modificadas durante su fabricación. Se componen de las letras PMB seguidas de tres números; los dos primeros representativos de su penetración mínima y máxima, separados por una barra inclinada a la derecha (/); y el tercer número, precedido de un guion (-), representativo del valor mínimo del punto de reblandecimiento.

2.2.2.2 Propiedades fundamentales de los ligantes hidrocarbonados:

La **termoplasticidad** de los ligantes hidrocarbonados hace que al elevarse la temperatura se reduzca su consistencia y, una vez que ésta corresponde a la de un líquido, la viscosidad sea cada vez menor. Al disminuir la temperatura, el proceso es el inverso hasta alcanzar una consistencia sólida con un módulo de rigidez cada vez mayor.

El **envejecimiento** es la alteración de las características iniciales del ligante con el paso del tiempo, como consecuencia del proceso de oxidación (por calentamiento o por la acción del aire), radiación solar, acción del agua y del tráfico, etc.

La **densidad relativa** de un ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura (25°C por ejemplo). Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes, o viceversa. Se determina con un picnómetro.

La **viscosidad** es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con que fluye. Por lo tanto, la de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto

de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación, cuando su consistencia es suficientemente reducida. Los viscosímetros más utilizados son del tipo Saybolt (Furol o Universal).

El ensayo más utilizado para evaluar de una manera práctica la consistencia de los betunes asfálticos y clasificarlos es el denominado de **penetración**. El ensayo se realiza de la forma siguiente: una aguja normalizada con una carga de 100g se sitúa verticalmente con su punta en la superficie de una muestra de betún (a temperatura de 25°C) y se deja caer libremente durante 5 s; el resultado del ensayo es la profundidad que, en décimas de milímetros, la aguja penetra en la muestra.

El **punto de reblandecimiento** se define por la temperatura a la que un disco de betún se reblandece hasta permitir que una pequeña bola de acero, apoyada inicialmente en su superficie, caiga a través de él. El resultado del ensayo se denomina **temperatura de anillo y bola**, es decir la temperatura de reblandecimiento del ligante.

A partir de los valores de la penetración a 25°C y de la temperatura de anillo y bola se puede determinar el **índice de penetración de un betún**, que da una cierta idea sobre sus características reológicas.

La **ductilidad** de un betún se mide por el alargamiento (en centímetros) que produce la rotura de una probeta de betún en condiciones fijas de temperatura (5 o 25°C, según los casos) y de la velocidad de deformación (5 cm/min). Los ligantes hidrocarbonados deben tener una ductilidad suficiente para soportar las deformaciones a las que se verán sometidos en las carreteras por el tráfico y las variaciones de térmicas.

2.2.3 Mezclas bituminosas convencionales

2.2.3.1 Tipos de mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado.

Los áridos se clasifican en unas fracciones uniformes, a partir de las cuales se compone la granulometría elegida.

Los ligantes más usuales son los betunes asfálticos de penetración intermedia, las emulsiones bituminosas de rotura media y lenta y ligantes modificados con polímeros.

Los tipos de mezcla bituminosa más empleados en la actualidad son:

2.2.3.1.1 Hormigones bituminosos en caliente (AC):

Son mezclas empleadas en todo tipo de vías. Se utilizan tanto en las capas de rodadura como en las capas inferiores de los firmes.

Se fabrican con betunes asfálticos o ligantes modificados.

Los hormigones bituminosos en caliente más empleados para las capas de rodadura son preferentemente mezclas cerradas debido a su pequeña proporción de huecos haciendo que sea prácticamente impermeable, cumpliendo así la misión del pavimento de proteger a las capas inferiores del firme y al cimiento de la acción del agua.

En capas inferiores, por ser más económica y menos críticas frente a fenómenos de deformación plástica, se suelen emplear mezclas semicerradas. Estas mezclas son más permeables debido a su menor % de filler y ligante.

2.2.3.1.2 Mezclas en frío:

Son mezclas fabricadas con emulsiones bituminosas y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de las carreteras secundarias debido a que estas obras no se suelen justificar económicamente las instalaciones más complejas que se requieren para la fabricación de las mezclas bituminosas en caliente.

Son mezclas formadas por árido grueso y por una emulsión bituminosa de rotura media, con una baja proporción de árido fino lo que conduce a una elevada proporción de huecos.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación, incluso durante semanas, debido a que el ligante permanece un largo tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean unas emulsiones de betún asfáltico fluidificado el cual provoca que el aumento de la viscosidad sea más lento en los acopios hasta su puesta en obra en capas de espesores reducidos en la que el endurecimiento es más rápido al evaporarse dicho fluidificante.

2.2.3.1.3 Mezclas Porosas o drenantes (PA):

Son mezclas que se emplean como capas de rodadura principalmente en las autopistas y en otras vías de circulación rápida.

Las mezclas porosas tienen una proporción muy elevada de huecos (20-30 %) lo que las confiere una gran permeabilidad. Utilizadas como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm, se consigue que el agua de lluvia caída sobre la calzada se evacue rápidamente por infiltración.

El empleo de estas mezclas requiere dispositivos constructivos y de mantenimiento que permitan la evacuación de del agua infiltrada y la realización de campañas periódicas de limpieza con unos equipos específicos que combinen la introducción de agua a presión con aspiración para evitar las colmataciones en los huecos.

2.2.3.1.4 Microaglomerados:

Son mezclas con un tamaño máximo del árido inferior a 10mm, lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor.

Los microaglomerados se han considerado especialmente adecuados para las zonas urbanas al extenderse en capas de pequeño espesor y así evitando problemas que pudieran surgir en relación con la altura de los bordillos o con el gálibo de las obras de paso.

En España están especificados desde 1997 unos microaglomerados de granulometría discontinua para capas de rodadura de pequeño espesor. Se prescribe el empleo, salvo para los tráficos pesados poco intensos, de betunes modificados con polímeros y de unos áridos muy resistentes al desgaste, son mezclas destinadas a capas de 1-3cm de espesor. Con ellas se consiguen unas texturas que proporcionan una elevada resistencia al deslizamiento, una cierta drenabilidad superficial e incluso una disminución del ruido debido al contacto neumático-pavimento.

Principalmente son microaglomerados fabricados en frío, o anteriormente denominados lechadas bituminosas o “slurry”.

2.2.3.1.5 Mezclas sin esqueleto mineral (masillas y asfaltos fundidos):

Son mezclas con elevada proporción de polvo mineral y de ligante, de manera que si hay árido grueso se halla disperso en la masilla formada por aquellos. Este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla.

No existen prácticamente huecos en la mezcla, que no se necesita compactación a las elevadas temperaturas (en torno a 200°C) a las que se extiende, y es impermeable.

Al tener una alta proporción de ligante, su precio es elevado; la forma tradicional de colocación manual encarece aún más el producto. Para que la superficie no sea deslizante, es preciso, en las vías de alta velocidad de circulación, recubrirlas con gravillas duras y de un tamaño uniforme, que extienden e incrustan parcialmente en el material todavía caliente.

2.2.3.1.6 Mezclas de alto módulo (MAM):

Aunque son también hormigones bituminosos en caliente, las mezclas de alto módulo para capas de base se fabrican con unos betunes muy duros (penetración 10/20), en unas proporciones próximas al 6% sobre la masa de los áridos y una proporción de polvo mineral también alta (8-10%).

Son mezclas con alto módulo de elasticidad (del orden de 11.000Mpa a 20°C) y una resistencia a la fatiga también relativamente elevada.

Se utilizan en capas de espesores entre 8 y 15cm tanto para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta.

La norma relaciona los posibles materiales a utilizar en las secciones de firme (Tabla 2.4).

2.2.3.2 Características de las mezclas bituminosas

2.2.3.2.1 Resistencia a las deformaciones plásticas

Bajo unas condiciones de altas temperaturas o de bajas velocidades de aplicación de las cargas, la respuesta mecánica de una mezcla bituminosa es viscoelástica. Por ello si la mezcla no tiene unas características reológicas adecuadas, puede producirse una acumulación de deformaciones plásticas e incluso la fluencia del material. Las roderas son unas deformaciones plásticas longitudinales que se pueden producir en mezclas mal formuladas en las zonas de rodada de los vehículos pesados.

Se mide con el ensayo de pista o rodadura (Figura 2.6).

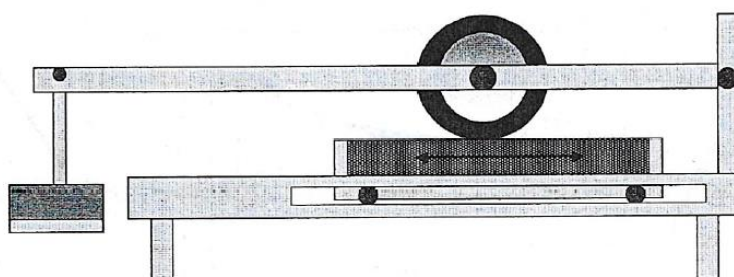


Figura 2.6: Máquina de ensayo de rodadura

2.2.3.2.2 Resistencia a la disgregación

En las mezclas con un importante esqueleto mineral, en las que la resistencia se debe casi exclusivamente al rozamiento interno, es muy difícil que se produzcan deformaciones plásticas. Sin embargo, los esfuerzos transmitidos por los vehículos pueden provocar una disgregación de la mezcla con un desprendimiento progresivo del material.

Es una propiedad para estudiar en mezclas porosas o drenantes. Se realiza el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste (Figura 2.7), consistente en la fabricación de probetas Marshall introducidas en la máquina Los Ángeles pero sin bolas y se da un número de revoluciones (300 mezclas porosas).



Figura 2.7: Máquina de Los Ángeles y probetas empleadas en el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste

2.2.3.2.3 Resistencia a la fatiga

Para unas condiciones de baja temperatura o de elevadas velocidades de aplicación de las cargas, las mezclas tienen un comportamiento prácticamente elástico. Entonces, el paso repetido de unas cargas con un valor inferior al de la rotura va produciendo un agotamiento progresivo del material por fatiga. El aumento de las deflexiones (desplazamientos elásticos en la superficie bajo la acción de una carga) puede conducir a un agrietamiento generalizado conocido como piel de cocodrilo.

Se realiza el ensayo de fatiga (Figura 2.8), consistente en determinar la resistencia que ofrece una probeta prismática de 41x6,5x5cm a la que se le somete a un proceso de flexión alternada. La frecuencia del ensayo se encuentra entre 10 y 30 Hz, obteniéndose las leyes de fatiga.

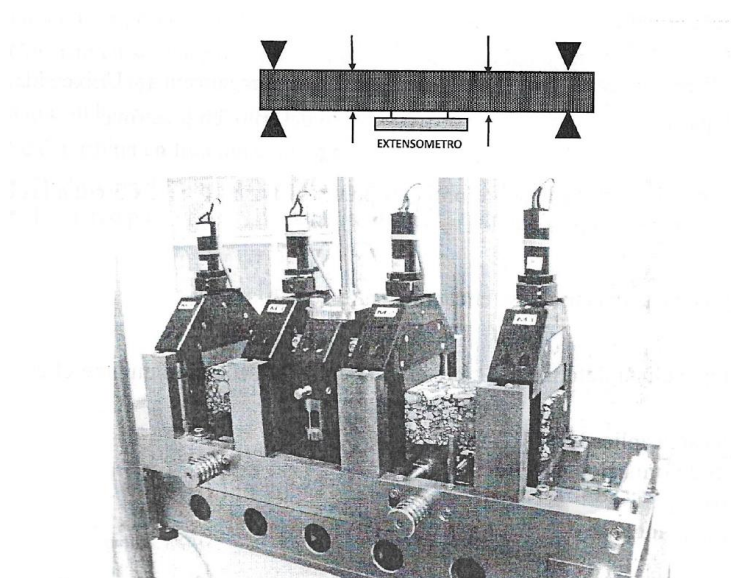


Figura 2.8: Máquina realizando el ensayo de fatiga

2.2.3.2.4 Flexibilidad y reología

Si las mezclas van a ser extendidas en un espesor total reducido (por ejemplo, menos de 12cm) sobre un soporte flexible, han de tener ellas también una flexibilidad suficiente para que no se rompan ni se fatiguen con excesiva rapidez.

Un soporte poco rígido (capa granular) puede deformarse por las compactaciones diferenciales debidas al tráfico e imponer a la mezcla bituminosa una deformación permanente superior a la correspondiente al límite elástico de la mezcla. Las deformaciones así producidas se caracterizan por su amplitud y su gran radio de curvatura.

El ensayo de módulo resiliente es un ensayo dinámico de tracción sobre probetas cilíndricas a las que

El módulo resiliente es el módulo empleado en la teoría elástica, después de la aplicación de un determinado número de aplicaciones de carga. Para su cálculo se realiza un ensayo

dinámico de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas conocido como el ensayo del módulo resiliente. (Figura 2.9)

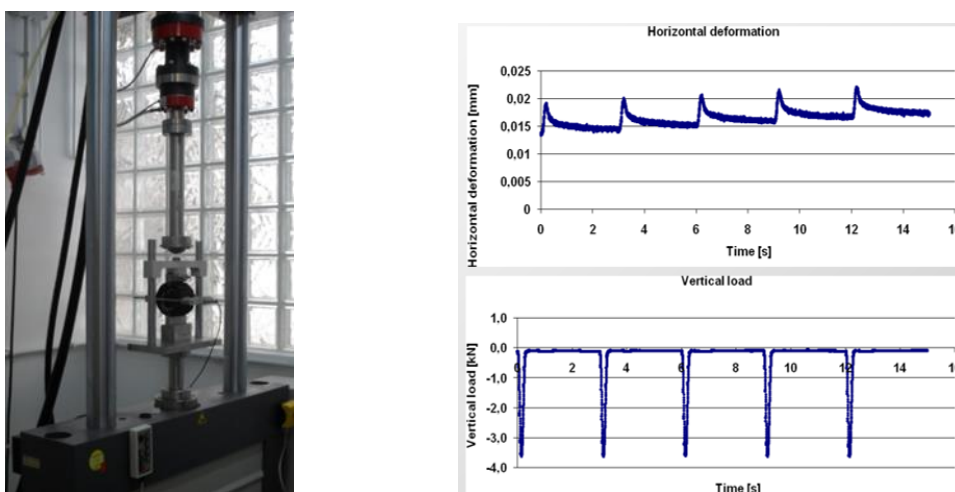


Figura 2.9: Máquina y ejemplo de resultados de un ensayo del módulo resiliente

2.2.3.2.5 Resistencia al deslizamiento

Las mezclas empleadas en capas de rodadura deben proporcionar una suficiente resistencia al deslizamiento que ha de mantener en el tiempo. Da idea de la textura y rozamiento de la superficie de la carretera. Para ello, es preciso, si se trata de carreteras con tráfico intenso y rápido, que el árido grueso empleado no sea pulimentable y que la macrotextura de la mezcla sea suficientemente rugosa, aunque intentando que no sea excesivamente ruidosa.

2.2.3.2.6 Impermeabilidad y permeabilidad

Otra función que deben cumplir las mezclas bituminosas empleadas en las capas superiores es la de proteger la infraestructura frente a la acción del agua que cae sobre la plataforma. Se debe de dotar en principio a las mezclas de una elevada impermeabilidad. Sin embargo, esta impermeabilidad no tiene por qué estar confinada a la capa de rodadura; si se utilizan mezclas porosas o drenantes, la impermeabilidad la ha de garantizar la capa inmediatamente inferior.

El equipo permeámetro LCS permite verificar que el pavimento drenante cumple las condiciones de permeabilidad. (Figura 2.10)

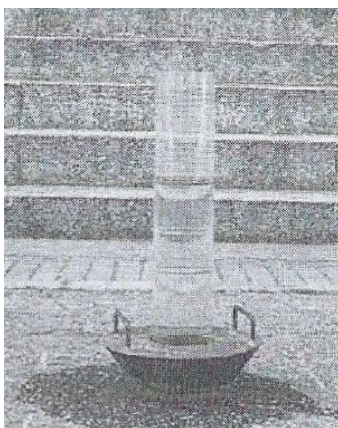


Figura 2.10: Equipo permeámetro LCS

2.2.3.2.7 Resistencia a los agentes externos

Las capas de rodadura se ven sometidas a unas agresiones externas de diversa índole aparte de la acción de las cargas. La radiación solar, la acción oxidante del aire y del agua, la helada y las sales fundentes empleadas contra ella, el derrame de aceites y de combustible, la contaminación producida por el desgaste de los neumáticos, el polvo, etc, son factores que afectan la durabilidad de la mezcla.

2.2.4 Mezclas bituminosas recicladas (sostenibles)

Se define como reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas a la mezcla homogénea, convenientemente extendida y compactada, del material resultante del fresado de una o más capas de mezcla bituminosa de un pavimento existente.

La ORDEN CIRCULAR 40/2017 del Ministerio de Fomento sobre “Reciclado de firmes y pavimentos bituminosos nos indica:

“El reciclado de firmes y pavimentos existentes comprende una serie de técnicas constructivas tendentes al máximo aprovechamiento de materiales envejecidos por el uso en la rehabilitación estructural de firmes y pavimentos de carretera. En el caso de los reciclados realizados in situ, los equipos de maquinaria integral y los sistemas constructivos específicos actuales para su ejecución permiten la consecución de unas técnicas eficientes y unos productos de alta calidad y homogeneidad, y a unos costes razonablemente competitivos frente a las soluciones tradicionales.”

Esta circular actualiza la O.C. 8/2001 introduciendo nuevas alternativas y variantes de valorización del residuo obtenido.

Los criterios de aplicación de las técnicas de reciclado indicados son (tabla 2.8):

TIPO DE RECICLADO	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00	T0	T1	T2	T3 y T4
En central	Reciclado + 10 cm (1)	Reciclado + 8 cm (1)	Reciclado + 5 cm (2)	Reciclado + 5 cm (2, 3)	Reciclado + rodadura (3, 4 ó 5)
In situ con emulsión	—	—	Reciclado + 8 cm (1)	Reciclado + 5 cm (2)	Reciclado + rodadura (3, 4 ó 5)
In situ con cemento	—	—	Reciclado + MBC	Reciclado + MBC	Reciclado + MBC

MBC Mezclas bituminosas (incluida capa de rodadura), con espesores de acuerdo con la Norma 6.3 IC Rehabilitación de firmes.

- (1) **Espesor total mínimo de 8 o 10 cm**, en doble capa, siendo 3 o 4 cm el espesor correspondiente a la capa de rodadura, según se trate de una mezcla discontinua o drenante (art. 543 del PG-3), respectivamente.
- (2) **Espesor total mínimo de 5 cm en capa única**. Para el espesor mínimo se dispondrá una sola capa de mezcla bituminosa en caliente o semicaliente del tipo densa (D) o semidensa (S) (art. 542 del PG-3) de 5 cm de espesor. En el caso de ser preceptiva una capa de rodadura drenante o discontinua, el espesor mínimo se elevará a 8 cm y se aplicará lo indicado en (1).
- (3) Mezcla bituminosa en caliente o semicaliente del tipo densa (D) o semidensa (S) reciclada en central conforme a lo indicado en el artículo 22 en su apartado 22.3.
- (4) Mezcla bituminosa en caliente o semicaliente del tipo densa (D) o semidensa (S) (art. 542 del PG-3).
- (5) Microaglomerado en frío (art. 540 del PG-3).

Tabla 2.8: Criterios de aplicación de las técnicas de reciclado (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Carreteras con categoría de tráfico pesado T00 y T0 Solamente se podrán emplear en capas de reposición de calzada mezclas bituminosas recicladas en central, sobre las que se dispondrán mezclas bituminosas (artículo 542 del PG-3) en un espesor total mínimo de 10 cm u 8 cm —según sean categorías de tráfico pesado T00 o T0—, incluida la capa de rodadura correspondiente (artículo 543 del PG-3).

Carreteras con categoría de tráfico pesado T1 Se podrán utilizar en capas de reposición de calzada las mezclas bituminosas recicladas en central en los mismos supuestos indicados para 6 las categorías de tráfico pesado T00 y T0, colocando capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en un espesor total mínimo de 5 cm, en capa única. En el caso de ser preceptiva la utilización de una capa de rodadura drenante o discontinua (artículo 543 del PG-3), el espesor total de mezcla bituminosa utilizado se elevará hasta un mínimo de 8 cm, incluida la capa de rodadura correspondiente, ejecutándose en dos capas. También podrán emplearse mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión en capas de reposición de calzada, cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en un espesor total mínimo de 8 cm, incluida la capa de rodadura correspondiente. En el caso de utilización de materiales granulares o tratados con cemento, el espesor de recrecimiento de mezclas bituminosas necesario se determinará siguiendo los criterios especificados en la Norma 6.3 IC Rehabilitación de firmes o Norma 6.1 IC. Secciones de firme, según el tipo de obra o reciclado a realizar.

Carreteras con categoría de tráfico pesado T2 Se aplicarán los mismos criterios indicados para la categoría de tráfico pesado T1, con la salvedad de que podrán emplearse como capa de rodadura mezclas bituminosas calientes y semicalientes recicladas en central, de acuerdo con lo indicado en el artículo 22 en su apartado 22.3. En el caso de empleo de mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión, el espesor total mínimo de las capas de recrecimiento con mezclas bituminosas, incluida la capa de rodadura, será de 5 cm.

Carreteras con categoría de tráfico pesado T3 y T4, incluidas las vías de servicio no agrícolas de autovías y autopistas. Podrán utilizarse todas las técnicas de reciclado indicadas en esta orden circular, con la condición de disponer sobre cualquiera de ellas, como mínimo, una capa de mezcla bituminosa en caliente o semicaliente del tipo densa (D) o semidensa (S) (artículo 542 del PG-3) o de microaglomerado en frío (artículo 540 del PG-3)

Los coeficientes de equivalencia aquí recogidos son los reflejados en la tabla 2.9.- Materiales para Rehabilitación Estructural de Firmes, del Anejo 2 de la Norma 6.3 IC Rehabilitación de firmes, a los que se les ha añadido las precisiones y concreciones que figuran en las notas al pie de la tabla (anotaciones 1, 2 y 3), conforme a la experiencia y conocimientos adquiridos en estos años, así como al estado actual de las técnicas de reciclado.

TIPO DE MATERIAL	COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA	LEY DE FATIGA	LIMITACIÓN DE ESPESOR (cm)
MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE O SEMICALIENTE (Densa, Semidensa y Gruesa)	1	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{0,27243}$	—
RECICLADO EN CALIENTE Y SEMICALIENTE EN CENTRAL DE CAPAS BITUMINOSAS	0,80 a 1 ⁽¹⁾	Ley específica	5 - 15
RECICLADO <i>IN SITU</i> CON EMULSIÓN DE CAPAS BITUMINOSAS	0,75 ⁽²⁾	Ley específica	6 - 12
RECICLADO <i>IN SITU</i> CON CEMENTO DE CAPAS DE FIRME	Material semejante al suelocemento		20 - 30 ⁽³⁾

- (1) El coeficiente de equivalencia dependerá de la proporción *r* de material bituminoso reciclado (RAP) utilizado, con el siguiente criterio: 1 si $15 < r \leq 30$; 0,9 si $30 < r \leq 60$ y 0,8 si $r \geq 60$.
- (2) Si el mezclado se efectúa en una central de fabricación de mezclas de las especificadas en los artículos 542 del PG-3 o 22 de esta Orden Circular, podrá adoptarse el coeficiente de 0,80.
- (3) Este valor máximo podrá aumentarse hasta 35 cm, siempre y cuando el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares especifique sistemas constructivos que garanticen una compacidad uniforme en todo el espesor de la capa.

Tabla 2.9: Coeficientes de equivalencia entre mezclas bituminosas en caliente o semicaliente y los diferentes tipos de material reciclado (Norma 6.3 IC “Rehabilitación de firmes” 2.003)

2.3 Método de dimensionamiento de Kraemer

El dimensionamiento analítico de los firmes se basa en el cálculo de las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos producidos por la acción de las cargas del tráfico y las variables climáticas y en su ulterior comparación con los valores admisibles en cada caso.

Un método analítico consta de dos partes:

-un modelo de repuesta, con el que se determinan las tensiones, deformaciones y desplazamientos, y

-un modelo de comportamiento, con el que se valoran las condiciones en las que se produce el agotamiento estructural del firme.

Las cargas aplicadas sobre el firme durante su vida útil son múltiples. El conjunto de todos los valores con sus correspondientes frecuencias de aplicación constituye un espectro de cargas. Para no tener que trabajar con todo el espectro, se recurre a establecer su equivalencia con una carga tipo empleándose como tal la carga máxima legal de un eje simple.

El análisis de los resultados del **modelo de Burmister**, mediante la aplicación del modelo de comportamiento, se dirige a determinar cuál es el número de aplicaciones de la carga tipo que puede soportar la estructura en cada una de sus capas antes de que llegue al agotamiento.

La carga se presenta mediante una presión vertical distribuida uniformemente sobre un círculo en la superficie del pavimento (carga estática). Lo que permite establecer una simetría axial y trabajar en coordenadas cilíndricas. (Figura 2.11)

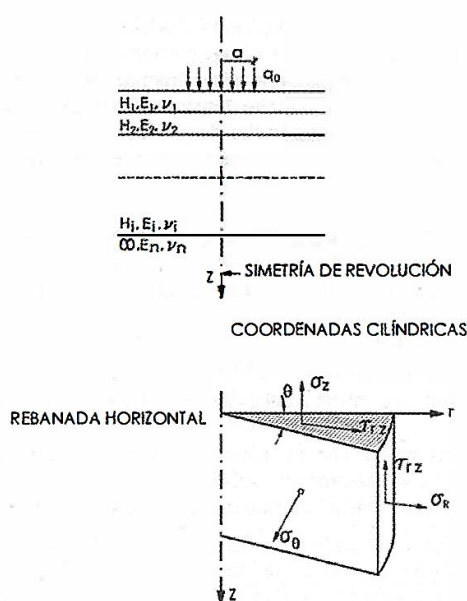


Figura 2.11: Esquema de distribución de cargas en la superficie del pavimento (Carlos Kraemer: Ingeniería de carreteras)

Cada capa actúa como un medio elástico lineal (definido por su módulo de elasticidad E , y su coeficiente de Poisson ν), homogéneo, isótropo, continuo de espesor constante e indefinido horizontalmente. El cimiento es un macizo semiindefinido de Boussinesq (definido igualmente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson)-

Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. Las condiciones de adherencia entre ellas (compatibilidad de deformaciones tangenciales en las interfaces) pueden presentarse mediante adherencia total o nula.

No se considera el efecto de los gradientes térmicos. Las influencias de las temperaturas en los módulos de los materiales sólo pueden ser tenida en cuenta repitiendo el análisis para diferentes valores de dichos módulos.

Se admite que los desplazamientos en el sistema son pequeños.

Realizados los correspondientes cálculos, en cada capa de la sección estudiada hay que considerar la tensión, deformación o desplazamiento que defina críticamente el comportamiento de dicha capa.

Los módulos de comportamiento más utilizados son los basados en **leyes de fatiga**.

Las leyes de fatiga son expresiones matemáticas obtenidas por correlación de los resultados de numerosos ensayos de laboratorio y calibradas en estudio a escala real. Con ellas se determina el número N de aplicaciones de una carga P, que puede soportar el material estudiado antes de llegar al agotamiento estructural, si cada aplicación individual de la carga produce unas determinadas tensiones o deformaciones. (Figura 2.12)

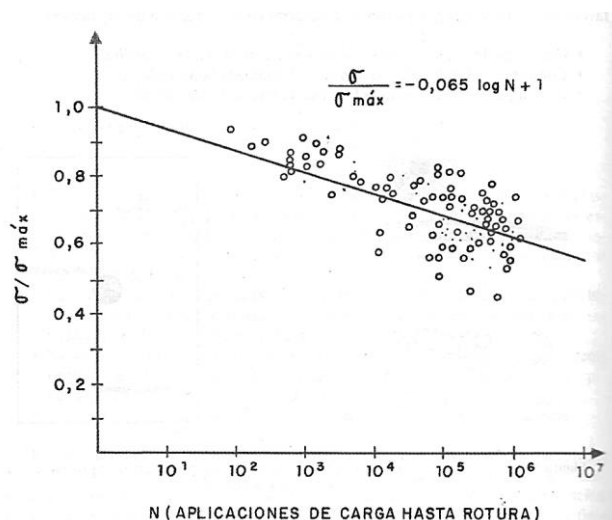


Figura 2.12: Ejemplo de ley de fatiga para una gravacemento (Carlos Kraemer: Ingeniería de carreteras)

La comparación del valor admisible del número de aplicaciones de la carga tipo con el tráfico esperado requiere establecer la equivalencia entre el espectro de cargas que constituye dicho tráfico y el número de aplicaciones de dicha carga tipo que produciría el mismo efecto destructivo en el firme. La equivalencia se suele basar en los siguientes principios deducidos del ensayo AASHO.

El ensayo AASHO supuso 25 mese circulando camiones del ejercito por una pista de ensayo. Se completaron 1.114.000 ciclos. Es un método muy difundido y válido para firmes flexibles o semirrígidos; supuso determinar relaciones entre el número de aplicaciones de ejes con diferentes espesores de sus capas.

-Un eje simple de magnitud P_i equivalente a un número de ejes simples de magnitud P_o dado por la expresión:

$$(P_i/P_o)^n$$

donde n depende del tipo de firme, siendo en general tanto mayor cuanto más rígido es éste. Para firmes flexibles se adopta el valor de $n=4$, deducido directamente del ensayo AASHO, mientras que para firmes semirrígidos y rígidos es habitual considerar valores en torno a 8 y a 12, respectivamente.

-Un eje doble de magnitud Q_i equivalente a un número de ejes simples de magnitud P_o dado por la expresión:

$$B \cdot (Q/2P_o)^n$$

donde n tiene el mismo valor que en el caso anterior y para B se suelen considerar valores de 2,5 en el caso de firmes rígidos y de 1,4 en otros tipos de firmes.

-Un eje triple de magnitud Q_i equivalente a un número de ejes simples de magnitud P_o dado por la expresión:

$$B \cdot (Q/3P_o)^n$$

donde n tiene el mismo valor que en el caso anterior y para B se suelen considerar valores de 2,3 en firmes bituminosos.

De las deformaciones y tensiones que se obtienen en cada capa del firme, se comprobarán el número de aplicaciones de carga tipo (leyes de fatiga) durante el periodo útil o de proyecto del firme que es de 20 años en firmes flexibles y de 30 años en firmes rígidos. En España, el coeficiente de equivalencia vehículos pesados – ejes tipo (CE) es de:

- En firmes flexibles y semiflexibles, un vehículo pesado medio equivale a 0,5 ejes de 13t.
- En firmes semirígidos, un vehículo pesado equivale a 0,6 ejes de 13t.
- En firmes rígidos, un vehículo pesado equivale a 1 eje de 13t.

Según el método de dimensionamiento de **Kraemer** (ponencia congreso año 2.004), la variable habitualmente empleada para estudiar el tráfico que soporta un firme es la intensidad media de vehículos pesados en el carril de proyecto y en el año de apertura al tráfico (IMDP). A la hora de adoptar en los cálculos un valor de esta IMDP que sea un máximo representativo de la categoría de tráfico pesado de la sección que se pretende calcular, se define un único valor (t) de manera que represente de modo razonablemente conservador a todo el intervalo de la categoría de tráfico, considerando:

- Tráfico T00: $t=7.000$ vehículos pesados (en ausencia de límite superior)
- Tráficos T0, T1 y T2: t dado por la expresión
- Tráficos T31, T32, T41 y T42: t dado por la expresión:

siendo t el valor que representa la categoría de tráfico a partir del cual el proyectista pasaría a la categoría superior, y siendo IMDP máx. el valor del extremo superior del intervalo que limita la categoría de tráfico a la que pertenece la IMDP.

De este modo, resultan los siguientes valores del límite razonable t de categoría de tráfico (tabla 2.10):

CATEGORÍA DE TRÁFICO		$IMD_{p\max}$	τ
T00		-	7.000
T0		4000	3.682
T1		2000	1.854
T2		800	748
T3	T31	200	171
	T32	100	87
T4	T41	50	44
	T42	25	22

Tabla 2.10: Valores límites propuestos del tráfico máximo admisible t para cada categoría (Kraemmer; ponencia congres año 2.004)

Pero tanto los métodos analíticos como la mayoría de los empíricos, utilizan para el cálculo el concepto de tráfico equivalente de proyecto (TEP), o lo que es lo mismo, el número de ejes tipo que solicitarán el firme durante el periodo de proyecto considerado.

Se adopta como eje tipo de carga representativo del tráfico de pesados el eje simple con ruedas gemelas de 13 toneladas (130 kN), equitativamente repartida entre las cuatro ruedas, con una presión de contacto de 0,8 MPa, radio de huella 11,35 cm y distancia entre centros de las ruedas gemelas de 37,5 cm.

La obtención del valor del tráfico equivalente de proyecto que es utilizado en los cálculos de dimensionamiento, se realiza mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$TEP = N = IMD_p \cdot CE \cdot 365 \cdot F \cdot \gamma \quad \text{siendo}$$

TEP: Tráfico equivalente de proyecto.

IMDP: Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto considerado, en el año de apertura al tráfico.

CE: Coeficiente de equivalencia medio de los vehículos pesados. Su valor representa la equivalencia de los vehículos pesados traducidos a ejes tipo de 13 toneladas, siendo los valores adoptados:

Firmes flexibles y semiflexibles:	CE = 0,5
Firmes semirrígidos:	CE = 0,6
Firmes con pavimento de hormigón:	CE = 1,0

F: Factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados. Representa la acumulación de tráfico durante el periodo de proyecto, y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

siendo r la tasa de crecimiento anual del tráfico de vehículos pesados constante en tanto por uno (se ha adoptad

γ : Coeficiente de seguridad en cargas. Se trata de un coeficiente de mayoración de cargas que se determina en función de la categoría de tráfico de proyecto, y que responde a la incertidumbre asociada al valor de las cargas de los vehículos pesados

que circulan por la carretera. En este trabajo se han aplicado los siguientes valores:

- Carreteras de tráfico T4: $\gamma = 1,06$
- Carreteras de tráfico T3 y T2: $\gamma = 1,12$
- Carreteras de tráfico T1 y T0: $\gamma = 1,15$
- Carreteras de tráfico T00: $\gamma = 1,18$

Con esta metodología se obtiene el número acumulado de ejes equivalentes que es capaz de soportar un firme de características de tráfico medias en su categoría.

Agrupando por tipologías de firmes, se obtienen los siguientes valores (tabla 2.11):

CATEGORÍA DE TRÁFICO		IMD _p DE CÁLCULO (T)	TEP ($\cdot 10^6$) firmes semiflexibles	TEP ($\cdot 10^6$) firmes semirrígidos	TEP ($\cdot 10^6$) pavimentos de hormigón
T00		7.000	40,5	48,6	143,4
T0		3.682	20,8	24,9	73,5
T1		1.854	10,4	12,5	37,0
T2		748	4,2	5,1	14,9
T3	T31	171	0,96	1,1	3,4
	T32	87	0,48	0,57	1,7

Tabla 2.11: Valores del tráfico equivalente de proyecto exigido (TEP) a las secciones en función de cada tipología de firme y categoría de tráfico (Kraemmer; ponencia congres año 2.004)

Para el análisis se suele considerar la **ley de Miner**: “El daño que produce una carga o sollicitación de una magnitud dada es siempre el mismo, independientemente del orden de aplicación”

Si solo aplicamos cargas de magnitud q_i su duración hasta rotura será N_i

El daño que produce una carga de magnitud q_i será: $d_i = 1/N_i$

Si aplicamos n_i cargas de magnitud q_i será: $d_i * n_i = n_i/N_i$

El daño total : $D = \sum(d_i * n_i) = \sum(n_i/N_i)$

Cuando el daño (D) es igual a 1 se considera que el firme está roto.

3 MATERIALES

3.1 Áridos naturales:

En este grupo se puede destacar algunos materiales que por sus características son especialmente adecuados para su empleo como árido en mezclas bituminosas de capas de rodadura.

En la mayoría de los casos estudiados se ha utilizado ofita como árido grueso, caliza como árido fino, filler calizo y/o los correspondientes aditivos o áridos sostenibles.

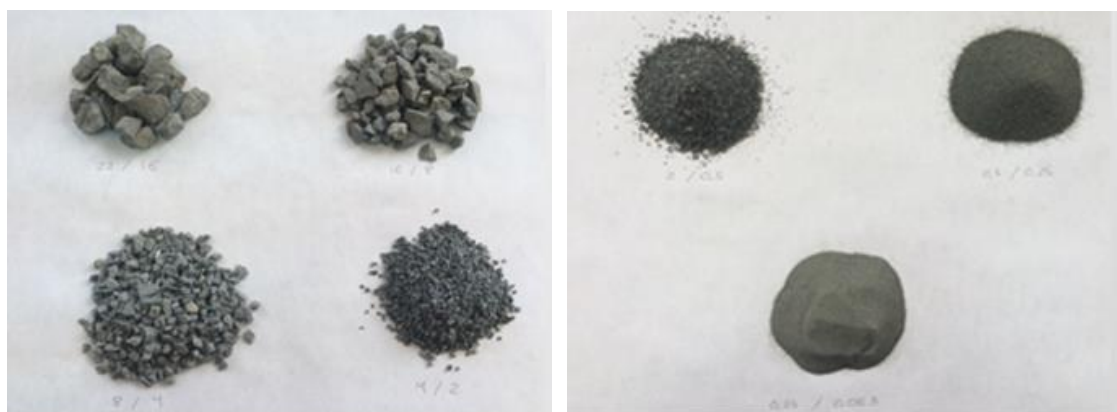


Foto 3.1: Áridos

3.2 Ligantes utilizados:

En la mayoría de los casos se han utilizado betunes B50/70 y betún modificado con polímeros como ligante base.

El **Betún B 50/70** con una penetración a 25°C de 50-70mm, un punto de renblandecimiento 46-54°C, un índice de penetración de -1,5 a +0,7, un punto de fragilidad Fraass ≤ -8 , una recuperación elástica a 25°C ≥ 70 .

En los casos en que se ha aditivado el correspondiente material sostenible al ligante por vía húmeda, se han formado nuevos ligantes modificados.

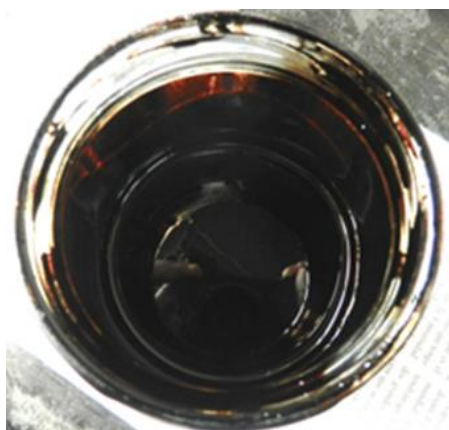


Foto 3.2: Ligante

3.3 Materiales y aditivos:

3.3.1 Sal común

La sal es un mineral cristalino compuesto de dos elementos: sodio y cloruro, cuya fórmula química es NaCl .

Se añade como aditivo a la mezcla, por vía seca, remplazándose el 5% sobre el árido.



Foto 3.3: Sal

3.3.2 Escorias negras

El proceso de fabricación del acero en las acerías de horno de arco eléctrico se compone de varias etapas, en la primera de ellas se funden las materias primas en horno de arco eléctrico, incluyendo una serie de fases como la oxidación, la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las escorias negras.

Se reemplaza, vía seca, un % s/a de la fracción gruesa de la mezcla porosa por áridos procedente de las escorias negras de acerías de horno de arco eléctrico.



Foto 3.4: Escorias negras

3.3.3 Cenizas de central térmica

Las centrales termoeléctricas generan una gran cantidad de residuos sólidos denominados cenizas durante la combustión del carbón.

Se remplaza, por vía seca, un % s/a del filler de la mezcla por cenizas procedente de central térmica.



Foto 3.5: Cenizas de central térmica

3.3.4 Plástico de Ecoembes

Son plásticos provenientes del proceso de reciclado que comienza cuando tiramos la basura, en este caso los envases plásticos en los contenedores amarillos. Posteriormente son transportados a las plantas de reciclado en donde se clasifican y continúan el proceso.

Ecoembes es una organización sin ánimo de lucro que cuida del medioambiente a través del reciclaje y el ecodiseño de los envases domésticos ligeros en España.



Foto 3.6: Contenedores Ecoembes para el reciclaje

Se remplaza, por vía húmeda, un % s/m del betún en volumen por plásticos procedentes de los contenedores amarillos.

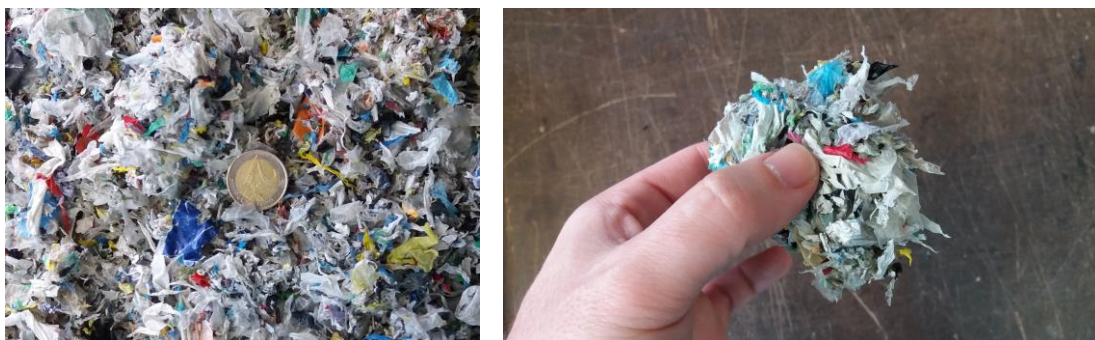


Foto 3.7: Plásticos procedentes de Ecoembes

3.3.5 Plástico procedente del pelado de cables de cobre

Son plásticos provenientes del proceso de reciclado de cables eléctricos, del cual el plástico supone aproximadamente el 65% del peso del cable. Mediante diferentes técnicas se recupera un alto % de este material que es reutilizado reduciendo así la cantidad de residuos.

Se remplaza, por vía húmeda, un % s/m del betún en volumen por plásticos procedentes del pelado de cables de cobre.



Foto 3.8: Plásticos procedentes del pelado de cables de cobre

3.3.6 Material de fresado

Es un material procedente de la rehabilitación de firmes, a los cuales se les ha de retirar el asfalto o firme de carretera que se encuentra en mal estado, agrietado o fisurado.

Se remplaza, por vía seca, un % s/a por material de fresado.

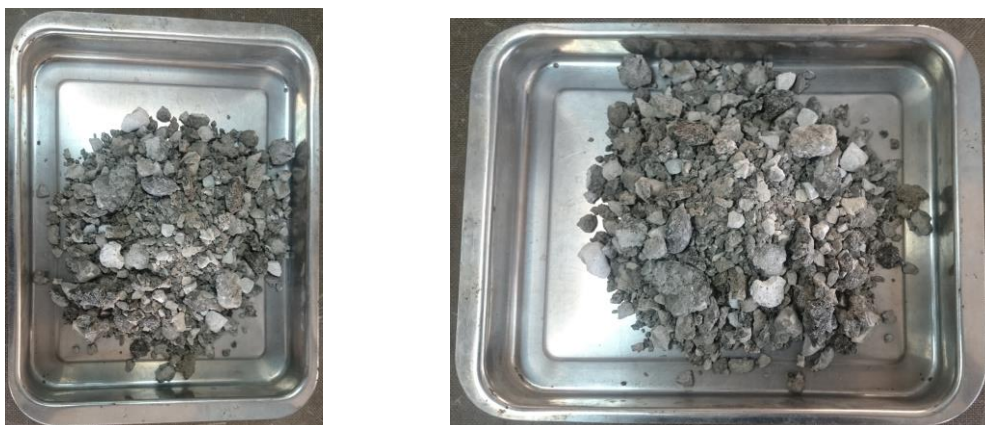


Foto 3.9: Material procedente de fresado

3.3.7 Cera sintética

La cera sintética es un producto químico que reproduce las propiedades de las ceras vegetales, animales, minerales o derivadas del petróleo. Las ceras sintéticas son producidas por el método Fischer Tropsch consistente en obtener combustibles líquidos tales como ceras, gas oil, gasolina, queroseno,..etc. a partir de monóxido de carbono e hidrogeno gaseosos.

Se añade cera, por vía húmeda, como aditivo al betún para reducir su temperatura de fabricación y mejorar la adhesividad árido-ligante.



Foto 3.10: Cera sintética

3.3.8 Lana de acero

Es un conjunto de hebras de varias fibras de acero finas.

Se añade lana de acero, por vía seca, como aditivo al árido para poder mejorar el cierre de las fisuras de las carreteras por inducción.



Foto 3.11: Lana de acero

3.3.9 Caucho

Es un polímero elástico, que surge como emulsión lechosa (látex) en la savia de varias plantas o producirse sintéticamente.

Se añade caucho, por vía húmeda, como aditivo al betún para reducir su temperatura de fabricación y mejorar la reología del ligante.



Foto 3.12: Caucho

4 METODOLOGIA

4.1 Secciones de firme analizadas

Para el presente estudio se han analizado firmes flexibles o semiflexibles para todas las categorías de tráfico pesado y de las categorías de explanada E2 y E3; igualmente se han evaluado todas las secciones compuestas de base de zahorra artificial (ZA) sobre suelo seleccionado (Figuras 4.1 y 4.2).

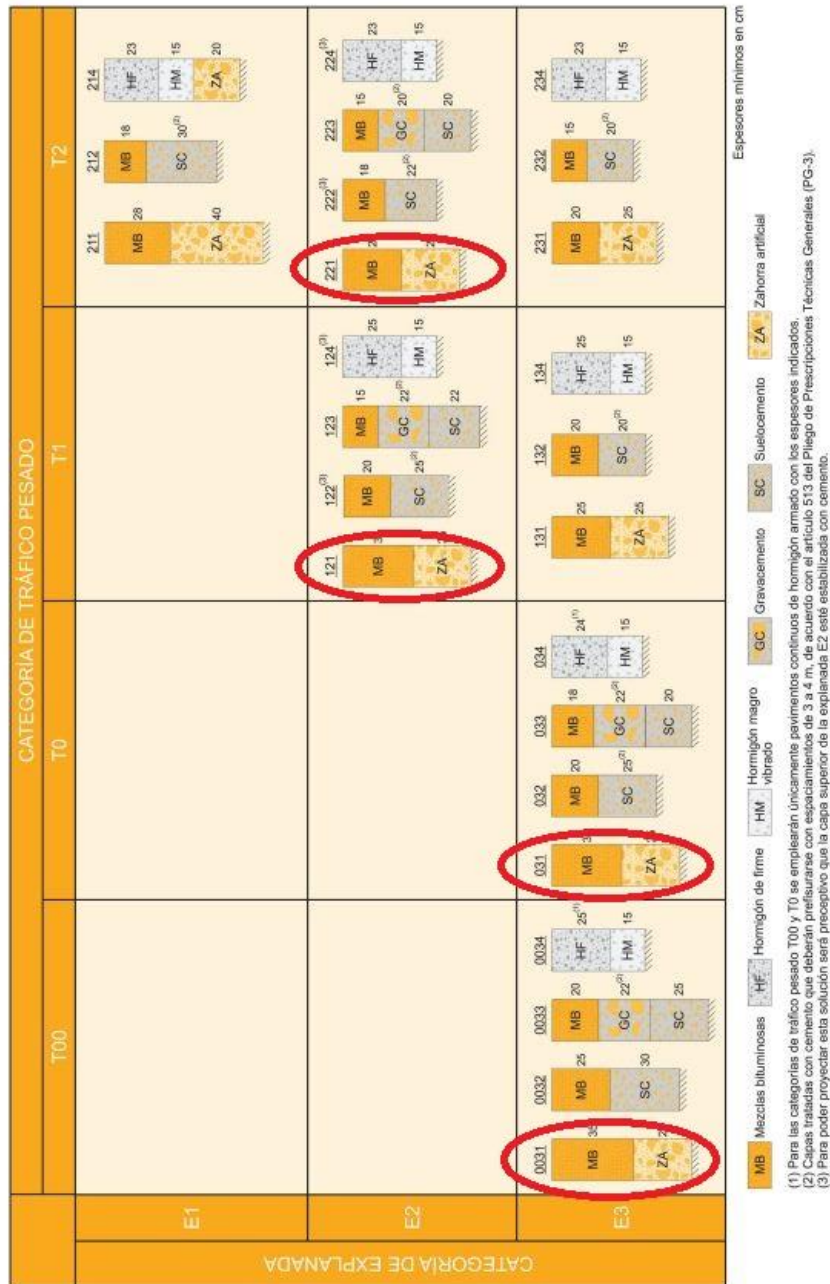


Figura 4.1: Secciones de firme analizadas de las categorías de tráfico T00, T0, T1 y T2 (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

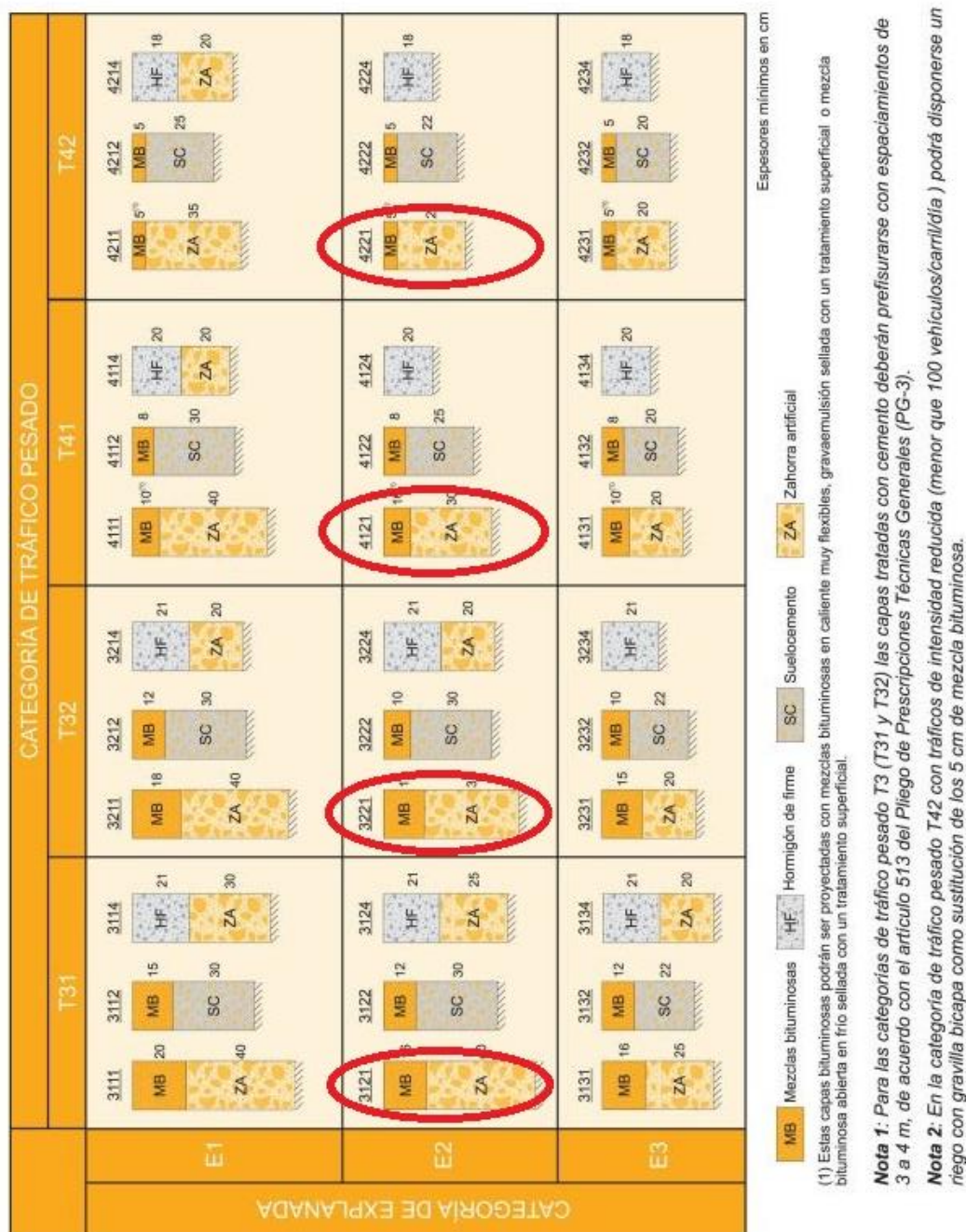


Figura 4.2: Secciones de firme analizadas de las categorías de tráfico T31, T32, T41 y T42 (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Siendo las secciones de firmes analizadas las siguientes:

- **Sección 0031** compuesta de:
4 cm de capa de rodadura: PA 16
10 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
14 cm*de capa base: AC 22 BASE S MAM

- **Sección 031** compuesta de:
4 cm de capa de rodadura: PA 16
7 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
13 cm*de capa base: AC 22 BASE S MAM
- **Sección 121** compuesta de:
4 cm de capa de rodadura: PA 16
7 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
13 cm*de capa base: AC 22 BASE S MAM
- **Sección 221** compuesta de:
Con PA:
4 cm de capa de rodadura: PA 16
9 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
12 cm de capa base: AC 32 base G
Con AC:
5 cm de capa de rodadura: AC 16 surf S
8 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
12 cm de capa base: AC 32 base G
- **Sección 3121** compuesta de:
Con PA:
4 cm de capa de rodadura: PA 16
5 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
7 cm de capa base: AC 32 base G
Con AC:
6 cm de capa de rodadura: AC 16 surf S
10 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
- **Sección 3221** compuesta de:
5 cm de capa de rodadura: AC 16 surf S
10 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
- **Sección 4121** compuesta de:
4 cm de capa de rodadura: AC 16 surf S
6 cm de capa intermedia: AC 22 bin S
- **Sección 4221** compuesta de:
5 cm de capa de rodadura: AC 16 surf S

* Al utilizar una base AC22 base S MAM la instrucción nos permite una reducción del 20% .

Se estudia analíticamente cómo se comportan dichas secciones remplazando las mezclas porosas (PA) y bituminosa (AC) de la capa de rodadura, donde la normativa los permita extender, por otras mezclas analizadas en el laboratorio de Caminos de la ETSICCP, por el Grupo Caminos Santander (GCS) de la Universidad de Cantabria.

De las mezclas bituminosas sostenibles, se parte de su módulo resiliente (módulo elástico, coeficiente de Poisson y su ley de fatiga).

4.2 Parámetros y Leyes de fatiga utilizadas para el cálculo matemático

En este trabajo se han adoptado unos valores estándar de los coeficientes de Poisson y de los módulos de deformación de los materiales, de tal modo que sean razonablemente representativos para las mezclas bituminosas de referencia (Tabla 4.1).

TIPO DE MATERIAL		E (Mpa)	μ
MEZCLAS BITUMINOSAS	S y D	7.000	0,33
	G	5.000	0,35
	MAM	11.000	0,30
	PA, F, M	4.000	0,35
	AF	1.500	0,35
MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO Y HORMIGONES	SC	8.000	0,25
	GC	20.000	0,25
	HM	25.000	0,20
	HF	32.000	0,20
MATERIALES GRANULARES Y EXPLANADAS	ZA sobre E1	180	0,35
	ZA sobre E2	360	0,35
	ZA sobre E3	600	0,35
	E1	60	0,35
	E2	120	0,35
	E3	300	0,35

Tabla 4.1: Parámetros constitutivos de los materiales empleados en los firmes (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

Para las leyes de fatiga de los materiales de las capas de firme de algunas secciones de referencia, empleadas en el presente trabajo, han sido las leyes propuestas por el Ministerio de Fomento en la norma IC 6.1, que en general, quedan del lado de la seguridad (Tabla 4.2).

Material	Coficiente de equivalencia	Ley de fatiga
Mezclas bituminosas en caliente (D, S y G).	1	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
Mezclas bituminosas de alto módulo (MAM).	1,25	$\epsilon_r = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
Zahorra artificial.	0,25	$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$

Tabla 4.2: Leyes de fatiga empleadas en los firmes (Norma 6.1 IC “Secciones de firme” 2.003)

En las mezclas bituminosas sostenibles los valores del módulo y ley de fatiga son los aportados por el laboratorio de Caminos de la Universidad de Cantabria, como se recogen en los “inputs” del apartado resultados.

4.3 Mezclas bituminosas analizadas

4.3.1 En capa de superficie

Mezcla PA16 de referencia

Los valores adoptados de la mezcla PA16 de referencia han sido:

Módulo de Elasticidad: 4.000Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,35

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2743*}$

*A falta de una ley fiable para las mezclas PA, se adopta la ley de la AC 16 como referencia.

Se estudia remplazar esta mezcla por las siguientes mezclas con materiales reutilizables/reciclables:

- Mezcla compuesta por Sal común añadida como árido (5% s/a):

Betún: B 50/70 (4,5% s/m).

Árido grueso: ofita;

Árido fino: ofita;

Filler: cal

Módulo de Elasticidad: 2.286Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,35

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 0,026 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1751}$

- Mezcla en la que se reemplazó la fracción gruesa de la mezcla porosa por escoria procedente de horno de arco eléctrico. Se añadió una cera para reducir la temperatura de fabricación del betún con caucho (150°C). Alta densidad:

Betún: B 50/70 (3.85% s/m).

Árido grueso: Escoria de arco eléctrico 88.0% s/a;

Árido fino: caliza 7.5% s/a.

Filler: calizo 4.5% s/a.

Módulo de Elasticidad: 1.906Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,35

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 3,951 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2299}$

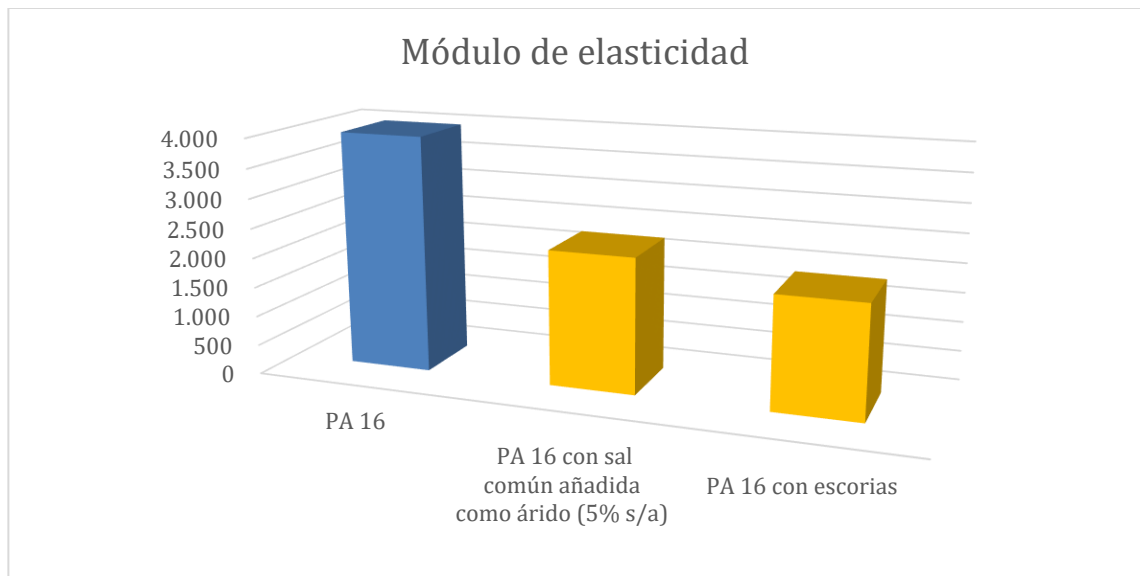


Tabla 4.3: Módulos de elasticidad de las mezclas analizadas

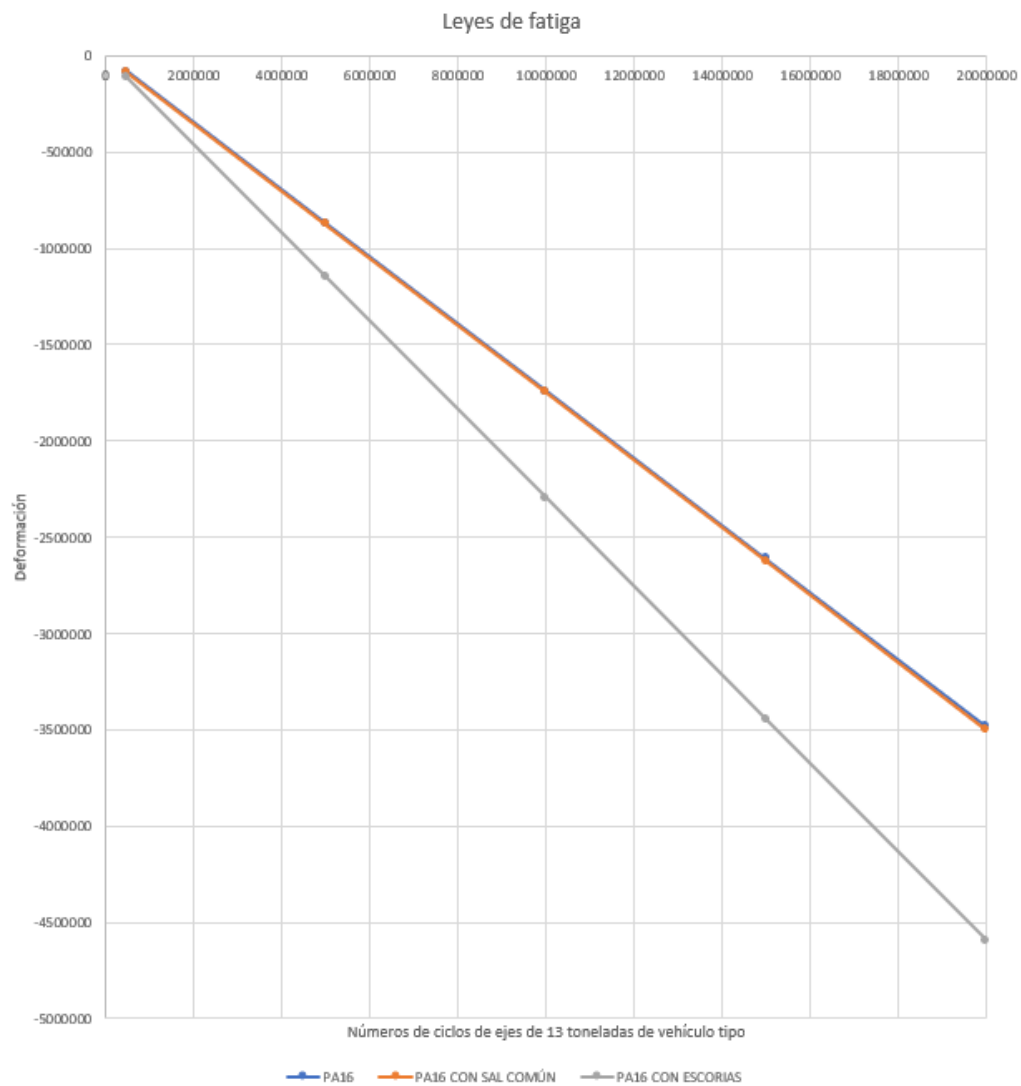


Tabla 4.4: Gráfica comparativas de las leyes de fatiga de las mezclas analizadas

Mezcla AC 16 Surf S de referencia

Los valores adoptados de la mezcla AC16 de referencia han sido:

Módulo de Elasticidad: 7.000Mpa

Coefficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2743}$

Se estudia remplazar esta mezcla por las siguientes mezclas con materiales reutilizables/reciclables:

- Mezcla compuesta por cenizas de central térmica (Asturias):

Betún: B 50/70 (5% s/m).

Árido grueso: ofita;

Árido fino: caliza;

Filler: (70%ceniza de central térmica+ 30%cal)

Módulo de Elasticidad: 6.632Mpa

Coefficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 0,945 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,25}$

- Mezcla compuesta por plástico de Ecoembes de envases procedentes del contenedor amarillo reemplazan un 25% del betún en volumen:

Betún: B 50/70 (3.4% s/m).

Árido grueso: ofita;

Árido fino y filler: caliza.

Plástico: 1.0% s/m.

Módulo de Elasticidad: 6.846Mpa

Coefficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,400 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1903}$

- Mezcla compuesta por plástico procedente del pelado de cables de cobre reemplazan un 25% del betún en volumen:

Betún: B 50/70 (3.4% s/m).

Árido grueso: ofita;

Árido fino y filler: caliza.

Plástico: 1.0% s/m.

Módulo de Elasticidad: 7.113Mpa

Coefficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,338 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1935}$

- Mezcla en la que se reemplaza los áridos naturales, se estudian tres alternativas dependiendo del % del árido reemplazado y modificación en fabricación, que son:

--- Áridos alternativos 01: se reemplazan por escoria de horno de arco eléctrico y fresado. Además, se añadió un rejuvenecedor para recuperar las propiedades del betún residual del material fresado. Alta densidad:

Betún: B 50/70 (3.8% s/m).

Árido grueso: Escoria de arco eléctrico 59.9% s/a;

Árido fino: caliza 18.5% s/a.

Arido grueso y fino: Fresado 21.5% s/a.

Módulo de Elasticidad: 6.166Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,374 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1653}$

--- Áridos alternativos 02: se remplazan por escoria de horno de arco eléctrico, arena de fundición y fresado. Además, se añadió un rejuvenecedor para recuperar las propiedades del betún residual del material fresado. Alta densidad:

Betún: B 50/70 (4.6% s/m).

Árido grueso: Escoria de arco eléctrico 50.5% s/a;

Árido fino: arena de fundición 12.1% s/a.

Filler: calizo 1.9% s/a.

Arido grueso y fino: Fresado 35.5% s/a.

Módulo de Elasticidad: 6.912Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,338 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1631}$

--- Áridos alternativos 03: se remplazan por escoria de horno de arco eléctrico y fresado. Se utilizó un betún modificado con caucho con ceras para reducir su temperatura de fabricación (150°C). Alta densidad.:

Betún: B 50/70 (3.8% s/m).

Árido grueso: Escoria de arco eléctrico 68.8% s/a;

Árido fino: caliza 16.5% s/a.

Filler: calizo 1.0% s/a.

Arido grueso y fino: Fresado 13.7% s/a.

Módulo de Elasticidad: 7.528Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,899 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1754}$

- Mezcla en la que se incluyó acero (lana de acero) para poder cerrar las fisuras de la carretera mediante inducción:

Betún: B 50/70 (4.4% s/m).

Árido grueso: ofita;

Árido fino: ofita 65.1% s/a;

Árido fino: calizo 33.0% s/a

Filler: calizo: 0.9% s/a.

Lana de acero: 1.0% s/a.

Módulo de Elasticidad: 6.373Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,309 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,1693}$

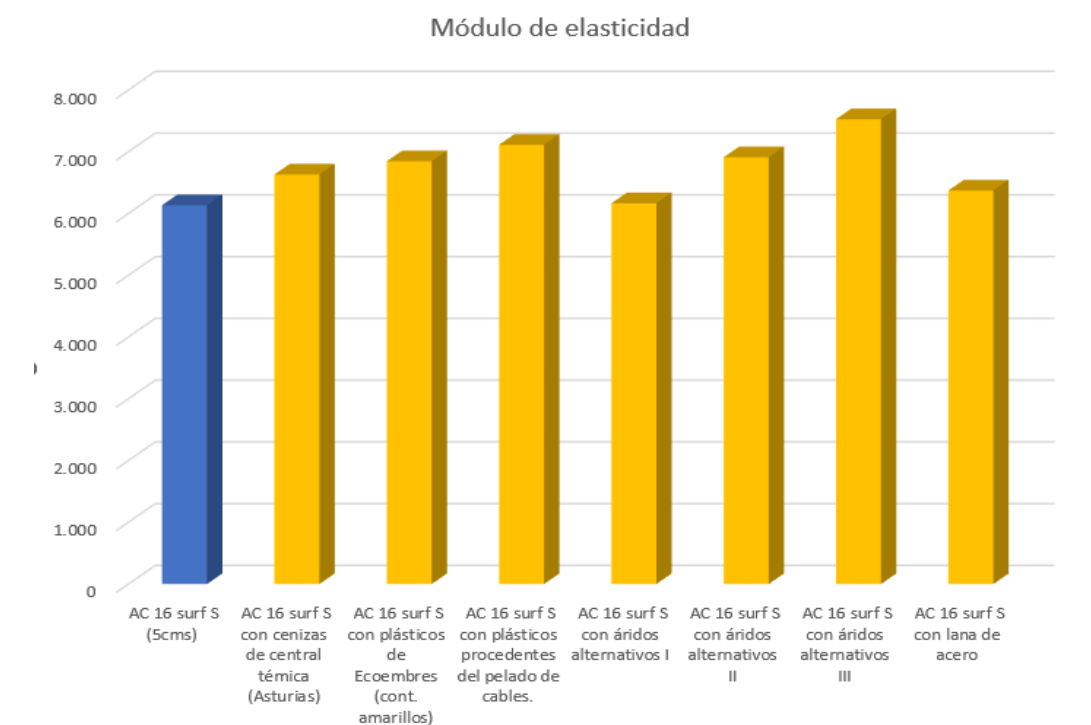


Tabla 4.5: Módulos de elasticidad de las mezclas analizadas

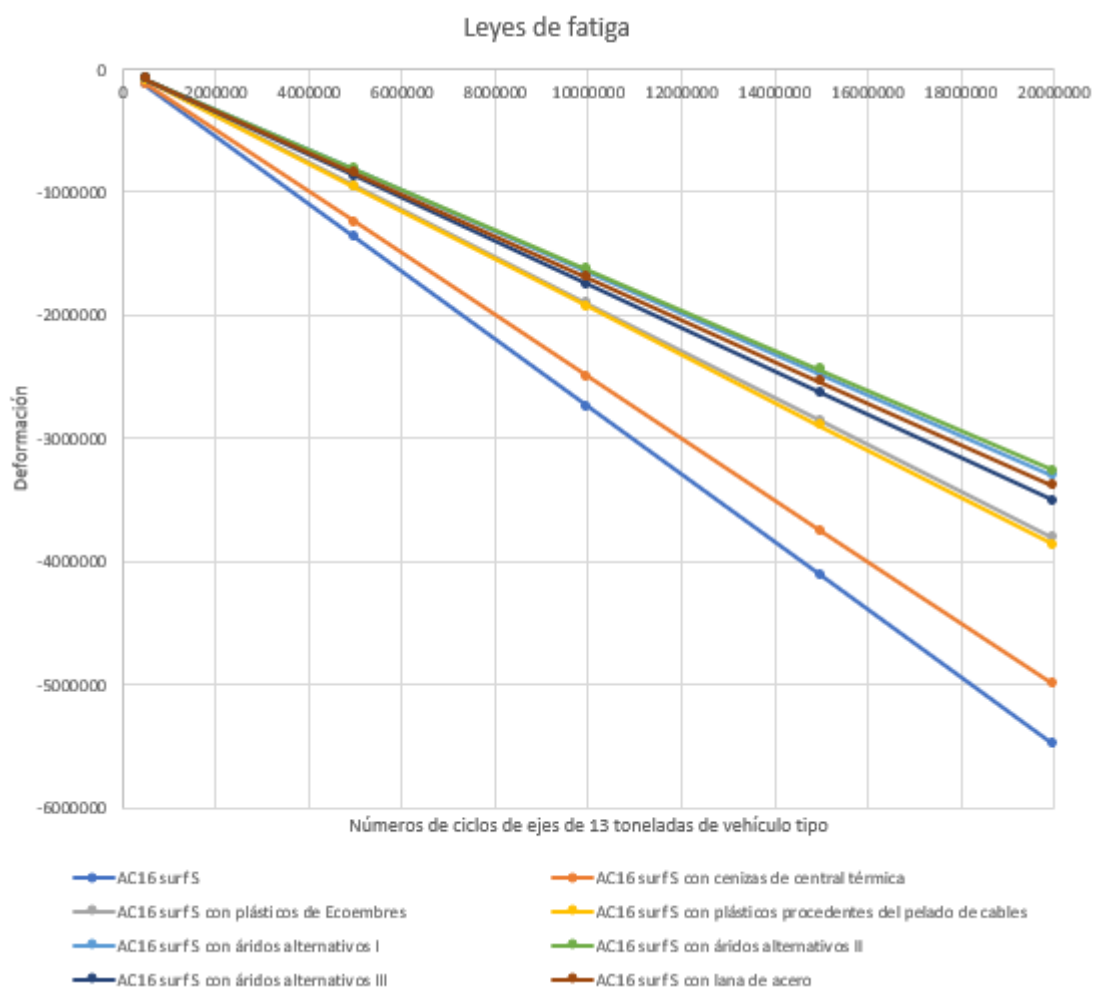


Tabla 4.6: Gráfica comparativas de las leyes de fatiga de las mezclas analizadas

4.3.2 En otras capas del firme

Los valores adoptados en las otras capas que componen los firmes analizados han sido:

En mezclas AC MAM en capa base, cuyos valores adoptados son:

Módulo de Elasticidad: 11.000Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2743}$

En capas de zahorra en capa subbase, cuyos valores adoptados son:

Módulo de Elasticidad: 300Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$

Para suelos seleccionados en formación de explanada, cuyos valores adoptados son:

Módulo de Elasticidad: 300Mpa

Coeficiente de Poisson: 0,33

Ley de fatiga: $\varepsilon \text{ (m/m)} = 1,58 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$

4.4. Programa Alize v 1.3.0

Estos resultados han sido obtenidos mediante métodos analíticos de dimensionamiento. Estos métodos permiten estimar las tensiones y deformaciones a las que se ve sometido el firme, para posteriormente comparar estos con unos valores patrón dados por el criterio de fallo. Son procedimientos que, aunque realizan una simplificación del fenómeno de la fatiga de un firme, permiten relacionar cualitativamente el comportamiento teórico de los firmes durante su vida útil.

El programa informático de cálculo analítico utilizado es Alizé versión 1.3.0 del LCPC, facilitado por el área de Caminos de la Universidad de Cantabria, ha sido la herramienta empleada para su cálculo (Figura 4.3).



Figura 4.3: Input programa Alize-LCPC

Con los datos aportados anteriormente se generaron, en el programa, las secciones a estudio, insertándose los espesores, módulos y coeficientes de cada capa (Figura.4.4).

The screenshot shows the 'Basis structure' window in Alize-LCPC. It features a table with five rows representing different pavement layers. The columns are 'thick. (m)', 'modulus (MPa)', 'Nu', and 'material type'. The first two layers are 'bonded' and the last two are 'unbond.'. To the right of the table are several control panels: 'Modify the structure' with buttons for adding or removing layers, 'Alternative data' with buttons for managing variants, 'Compute. level (m)' with a button to modify levels, and a 'Help' section with buttons for interface type, mini-maxi thicknesses, fast computation, and quitting the program.

	thick. (m)	modulus (MPa)	Nu	material type
	0,04	4000	0,35	other
bonded	0,1	7000	0,33	other
bonded	0,14	11000	0,3	other
unbond.	0,25	300	0,35	other
unbond.	infinite	300	0,35	other

Figura 4.4: Ventana inserción de las capas del firme a analizar en Alize-LCPC

Antes de realzar los cálculos definimos el eje de rueda gemela, donde el radio de efecto de cada neumático es 0,1135m y la presión de 0,8Mpa, siguiendo el método de Kraemer (Figura.4.5).

The screenshot shows the 'Alize-Lcpc - Defining the reference load' dialog box. It has a 'Reference load : Not standard dual-wheel' section with a diagram of two wheels separated by distance 'd', with vertical axis 'Y(m)' and horizontal axis 'X(m)'. Below the diagram are four radio button options: 'option 1 : French standard dual-wheel', 'option 2 : Not standard dual-wheel' (which is selected), 'option 3 : single wheel', and 'option 3 : No reference load'. To the right is a 'Characteristics' section with input fields for 'radius (m)' (0,1135), 'pressure (MPa)' (0,8000), 'weight (MN)' (0,03238), and 'Dual-wheel spacing (m)' (0,3750). At the bottom right is a 'Computation points' section with two radio button options: 'points (x=0 and d/2 y=0 z=interfaces)' (selected) and 'other points, to be defined'. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figura 4.5: Ventana referencia de cargas en los firmes analizados en Alize-LCPC

Los resultados aportados por el programa nos indican las diferentes deformaciones que se producen en cada capa del firme analizado (Figura.4.6).

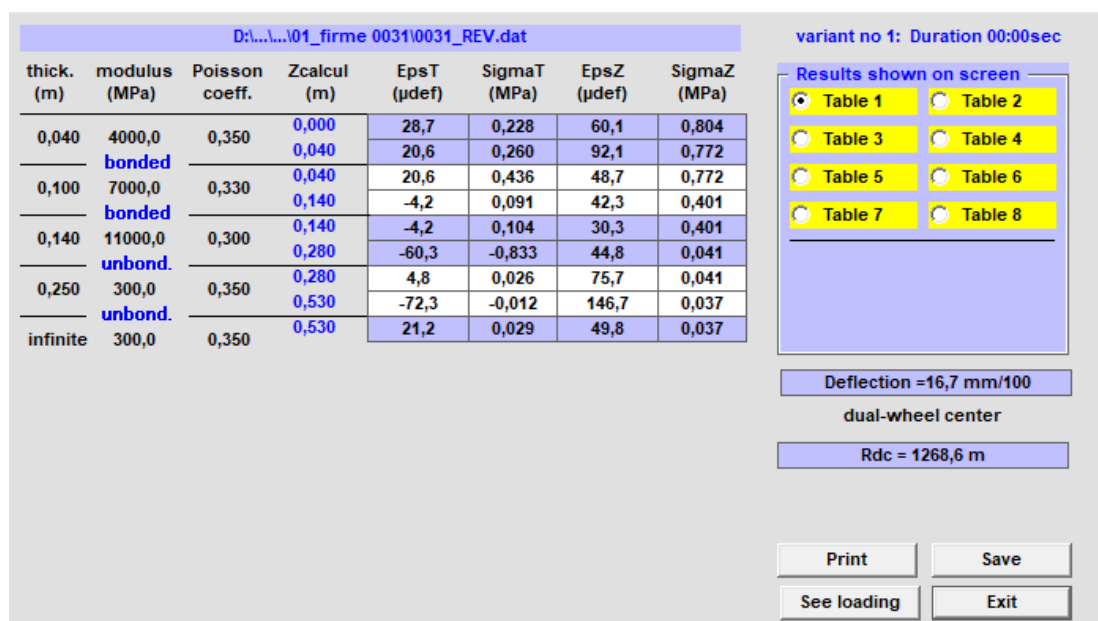


Figura 4.6: Ventana de resultados de deformaciones de las capas del firme analizadas en Alize-LCPC

El programa facilita un informe de los resultados obtenidos de las deformaciones de las capas del firme analizadas (Figura.4.7).

Alize-Lcpc - Design of pavement structures
according to the French Lcpc-Setra rational method

Description of the calculation

- data Structure : direct input
- file origin D:\...01_firme 00310031_REV.dat
- title of the study no title

- load data :

- special dual-wheel (not the French standard one), weight 064,753 kN
- vertical pressure : 0,8000 MPa
- contact radius : 0,1135 m
- dual-wheel spacing: 0,3750 m

units: m, MN and MPa; strains in μstrain; deflection in mm/100

Table 1 (synthesis):

**major main traction stresses in the horizontal plane XoY and
major main compression stresses along the vertical ZZ axis; maximal deflection**

level comput.	EpsilonT horizontal	SigmaT horizontal	EpsilonZ vertical	SigmaZ vertical
<i>surface (z=0,000)</i>				
th= 0,040 m 0,000m	28,7	0,228	60,1	0,804
Yg= 4000,0 MPa				
nu= 0,350 0,040m	20,6	0,260	92,1	0,772
<i>bonded (z=0,040m)</i>				
th= 0,100 m 0,040m	20,6	0,436	48,7	0,772
Yg= 7000,0 MPa				
nu= 0,330 0,140m	-4,2	0,091	42,3	0,401
<i>bonded (z=0,140m)</i>				
th= 0,140 m 0,140m	-4,2	0,104	30,3	0,401
Yg= 11000,0 MPa				
nu= 0,300 0,280m	-60,3	-0,833	44,8	0,041
<i>unbond. (z=0,280m)</i>				
th= 0,250 m 0,280m	4,8	0,026	75,7	0,041
Yg= 300,0 MPa				
nu= 0,350 0,530m	-72,3	-0,012	146,7	0,037
<i>unbond. (z=0,530m)</i>				
th. infinite 0,530m	21,2	0,029	49,8	0,037
Yg= 300,0 MPa				
nu= 0,350				

Maximal deflection = 16,7 mm/100 (dual-wheel center)
Curvature radius = 1268,6 m (dual-wheel center)

Figura 4.7: Informe emitido de los resultados de deformaciones de las capas del firme analizadas en Alize-LCPC

5. RESULTADOS

Con las tensiones y deformaciones aportadas por el programa Alizce y las leyes de fatiga correspondientes se procede al estudio de los ciclos de durabilidad de cada capa en cada sección de firme, con los siguientes resultados:

5.1 Sección 0031 tipo:

5.1.1 Sección 0031 con PA16 convencional

		0031	T 00	E 3	
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
PA 16	4.000	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-4,20	535.373.085.300
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,14	-60,30	27.438.862
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	146,70	55.327.565
Riego de curado					
SUELO ESTABILIZADO IN SITU	300	0,35		49,80	46.635.075.011
Suelos adecuados					
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 35cm restantes (35 - 7 = 28cm)					

5.1.2 Sección 0031 con PA16 con sal común

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
PA 16 con sal común añadida como árido (5% s/a)	2.286	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-3,00	1.825.522.757.000
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,14	-62,40	24.219.507
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	153,90	46.625.711
Riego de curado					
SUELO ESTABILIZADO IN SITU	300	0,35		52,10	37.103.796.106
Suelos adecuados					
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 35cm restantes (35 - 7 = 28cm)					

5.1.3 Sección 0031 PA16 con escorias

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
PA 16 con escorias	1.906	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-2,70	2.680.419.367.000
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,14	-63,00	23.389.135
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	155,70	44.729.060
Riego de curado					
SUELO ESTABILIZADO IN SITU	300	0,35		52,70	37.103.796.106
Suelos adecuados					
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 35cm restantes (35 - 7 = 28cm)					

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 27.438.862 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura PA16 por las alternativas estudiadas:

0031	T 00	E 3		
	Modulo (Mpa)	N		
PA 16	4.000	27.438.862		
PA 16 con sal común añadida como árido (5% s/a)	2.286	24.219.507	- 3.219.355	-11,73%
PA 16 con escorias	1.906	23.389.135	- 4.049.727	-14,76%

- En ambos casos la capa base AC 22 base S MAN es la que fallaría.
- En el caso de PA16 con sal común se reduciría la vida útil del firme aprox. un 11,73%.
- En el caso de PA16 con escorias se reduciría la vida útil del firme aprox. un 14,76%.

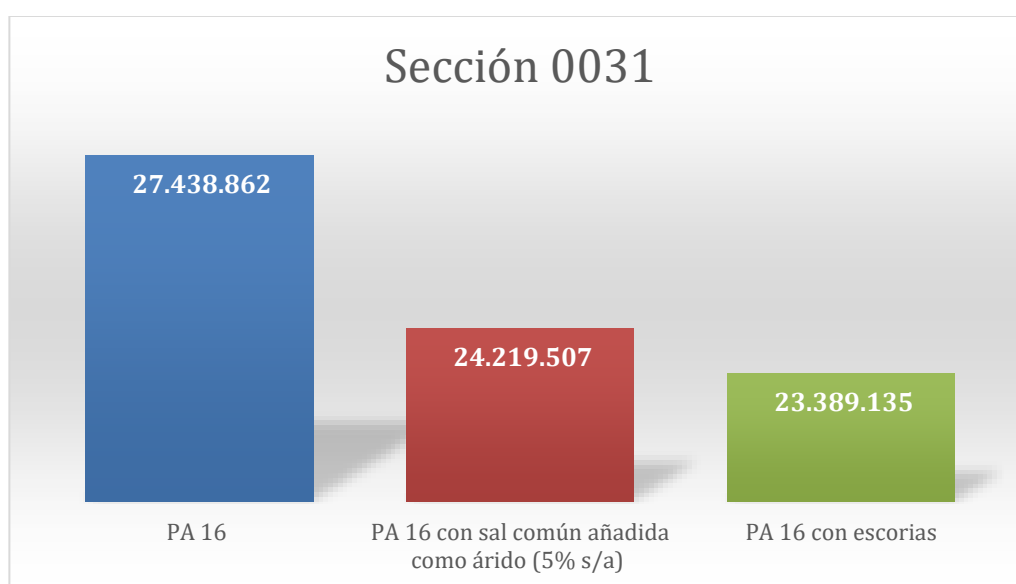


Tabla 5.1: Resultados de los ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 0031

5.2 Sección 031 tipo:

5.2.1 Sección 031 con PA16 convencional

		031	T 0	E 3	
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
PA 16	4.000	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,07	-0,50	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,13	-74,90	12.447.321
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	186,40	23.521.043
Riego de curado					
SUELO ESTABILIZADO IN SITU	300	0,35		62,10	4.190.462.390
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 30cm restantes (30 - 6 = 24cm)					

5.2.2 Sección 031 con PA16 con sal común

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
PA 16 con sal común añadida como árido (5% s/a)	2.286	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,07	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,13	-78,00	10.736.579
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	196,90	19.340.035
Riego de curado					
SUELO ESTABILIZADO IN SITU	300	0,35		65,40	3.406.570.291
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 30cm restantes (30 - 6 = 24cm)					

5.2.3 Sección 031 con PA16 con escorias

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
PA 16 con escorias	1.906	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,07	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,13	-78,80	10.344.508
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	199,70	18.388.911
Riego de curado					
SUELO ESTABILIZADO IN SITU	300	0,35		66,30	3.225.330.580
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 30cm restantes (30 - 6 = 24cm)					

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 12.447.321 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura PA16 por las alternativas estudiadas:

031	T 0	E 3		
	Modulo (Mpa)	N		
PA 16	4.000	12.447.321		
PA 16 con sal común añadida como árido (5% s/a)	2.286	10.736.579	- 1.710.742	-13,74%
PA 16 con escorias	1.906	10.344.508	- 2.102.813	-16,89%

- En ambos casos la capa base AC 22 base S MAN es la que fallaría.
- En el caso de PA16 con sal común se reduciría la vida útil del firme aprox. un 13,74%.
- En el caso de PA16 con escorias se reduciría la vida útil del firme aprox. un 16,89%.

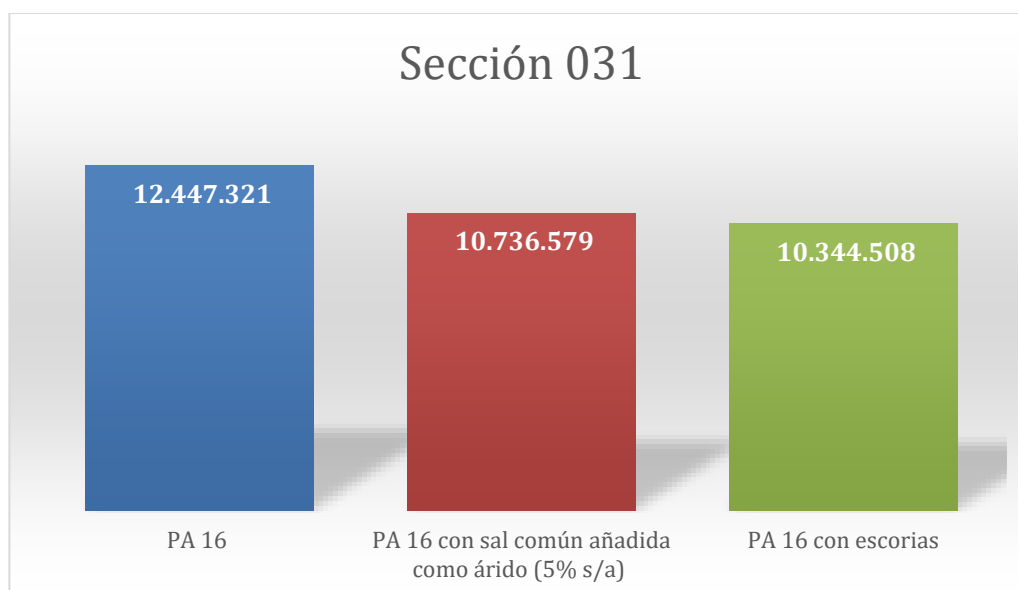


Tabla 5.2: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 031

5.3 Sección 121 tipo:

5.3.1 Sección 121 con PA16 convencional

		121	T 1	E 2	
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
PA 16	4.000	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,07	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,13	-87,30	7.120.695
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	165,50	35.967.761
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		106,00	493.633.797
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 30cm restantes (30 - 6 = 24cm)					

5.3.2 Sección 121 con PA16 con sal común

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
PA 16 con sal común añadida como árido (5% s/a)	2.286	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,07	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,13	-91,20	6.071.918
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	176,50	28.582.730
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		112,30	391.840.500
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 30cm restantes (30 - 6 = 24cm)					

5.3.3 Sección 121 con PA16 con sal común

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
PA 16 con escorias	1.906	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,07	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 base S MAN	11.000	0,30	0,13	-92,20	5.835.254
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	179,30	27.020.347
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		114,00	368.985.196
* Al utilizar una base AC22 base S MAN nos permite una reducción del 20% en los 30cm restantes (30 - 6 = 24cm)					

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 7.120.695 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura PA16 por las alternativas estudiadas:

<u>121</u>	<u>T 1</u>	<u>E 2</u>		
	Modulo (Mpa)	N		
PA 16	4.000	7.120.695		
PA 16 con sal común añadida como árido (5% s/a)	2.286	6.071.918	- 1.048.777	-14,73%
PA 16 con escorias	1.906	5.835.254	- 1.285.441	-18,05%

- En ambos casos la capa base AC 22 base S MAN es la que fallaría.
- En el caso de PA16 con sal común se reduciría la vida útil del firme aprox. un 14,73%.
- En el caso de PA16 con escorias se reduciría la vida útil del firme aprox. un 18,05%.

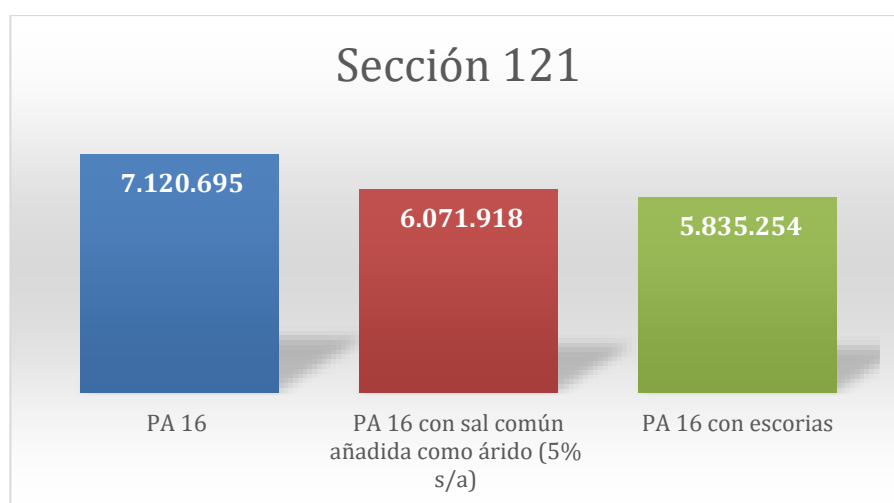


Tabla 5.3 Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 121

5.4 Sección 221 con PA 16 tipo:

5.4.1 Sección 221 con PA16 convencional

		221	T 2	E 2	con PA 16
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
PA 16	4.000	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-18,00	2.657.817.995
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-107,60	3.922.275
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	177,00	28.295.411
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		112,30	391.840.500

5.4.2 Sección 221 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-21,50	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,40	4.698.555
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	164,10	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		104,90	

5.4.3 Sección 221 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-21,70	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,10	4.749.082
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	163,30	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		104,40	

5.4.4 Sección 221 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-22,00	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-101,70	4.817.533
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	162,20	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		103,80	

5.4.5 Sección 221 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-20,90	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-103,20	4.567.126
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	166,10	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		106,00	

5.4.6 Sección 221 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-21,80	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,00	4.766.078
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	163,00	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		104,20	

5.4.7 Sección 221 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-22,40	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-101,10	4.922.585
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	160,60	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		102,90	

5.4.8 Sección 221 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,09	-21,20	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,90	4.615.856
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	165,20	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		105,50	

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 3.922.275 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura PA16 por las alternativas estudiadas:

221	T 2	E 2	con PA 16	
	Modulo (Mpa)	N		
PA 16 (4cms)	4.000	3.922.275		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	4.698.555	776.280	19,79%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	4.749.082	826.807	21,08%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	4.817.533	895.258	22,82%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	4.567.126	644.851	16,44%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	4.766.078	843.803	21,51%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	4.922.585	1.000.310	25,50%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	4.615.856	693.581	17,68%

- En todos los casos la capa base AC 32 base G es la que fallaría.
- En todos los casos se mejora la vida útil del firme.
- Dependiendo de la alternativa esta mejora puede variar entre aprox. un 16 a 25%.

Sección 221 con PA16

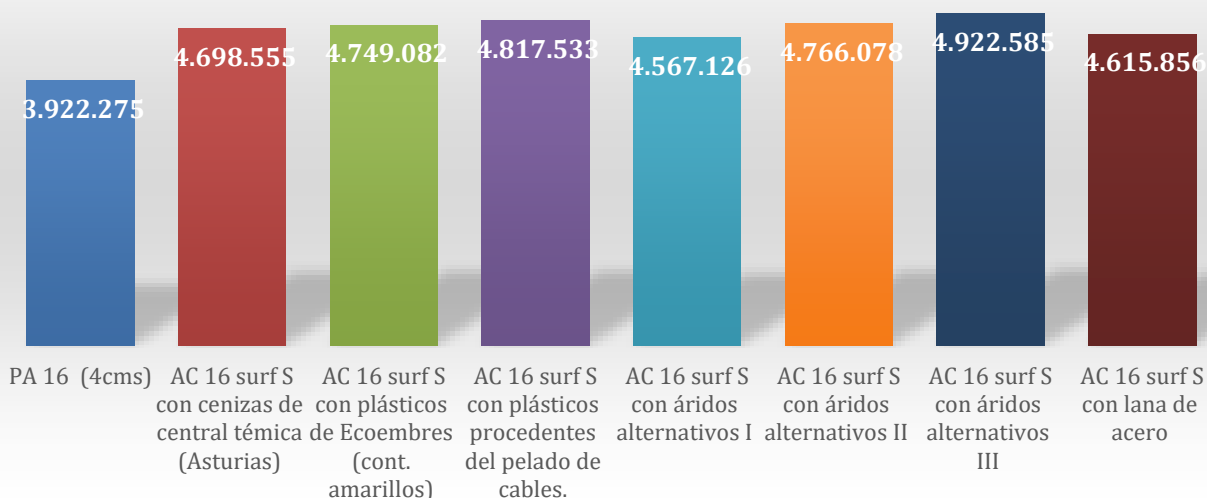


Tabla 5.4: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 221 con PA16

5.5 Sección 221 con AC 16 tipo:

5.5.1 Sección 221 con AC16 convencional

		<u>221</u>	<u>T 2</u>	<u>E 2</u>	con AC16
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S	6.135	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-20,70	1.596.770.693
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-103,50	4.519.049
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	166,80	34.976.594
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		106,40	486.252.487

5.5.2 Sección 221 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-21,40	1.414.447.931
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,50	4.681.865
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	164,40	36.834.681
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		105,00	512.709.248

5.5.3 Sección 221 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-21,70	1.344.452.764
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,10	4.749.082
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	163,40	37.646.131
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		104,40	524.597.664

5.5.4 Sección 221 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-22,00	1.278.812.197
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-101,70	4.817.533
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	162,20	38.650.331
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		103,70	538.906.376

5.5.5 Sección 221 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-20,70	1.596.770.693
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-103,40	4.535.003
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	166,70	35.051.586
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		106,30	488.084.807

5.5.6 Sección 221 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-21,70	1.344.452.764
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-102,00	4.766.078
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	163,10	37.894.019
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		104,30	526.612.440

5.5.7 Sección 221 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-22,50	1.178.218.622
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-101,00	4.940.377
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	160,40	40.221.855
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		102,70	560.204.474

5.5.8 Sección 221 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,08	-21,00	1.515.163.125
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,12	-103,00	4.599.539
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	165,60	35.890.250
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		105,70	499.261.869

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 4.519.049 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura AC 16 por las alternativas estudiadas:

221	T 2	E 2	con AC16	
	Modulo (Mpa)	N		
AC 16 surf S (5cms)	6.135	4.519.049		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	4.681.865	162.816	3,60%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	4.749.082	230.033	5,09%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	4.817.533	298.484	6,61%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	4.535.003	15.954	0,35%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	4.766.078	247.029	5,47%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	4.940.377	421.328	9,32%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	4.599.539	80.490	1,78%

- En todos los casos la capa base AC 32 base G es la que fallaría.
- En todos los casos se mejora la vida útil del firme.
- Dependiendo de la alternativa esta mejora puede variar entre un 0 a 9% aprox.



Tabla 5.5: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 221 con AC16

5.6 Sección 3121 con PA 16 tipo:

5.6.1 Sección 3121 con PA16 convencional

		3121	T 31	E 2	con PA16
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
PA 16	4.000	0,35	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-26,70	631.320.346
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-182,40	572.678
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	323,50	3.283.637
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		164,80	11.953.623

5.6.2 Sección 3121 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-35,90	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-173,50	687.248
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	300,00	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		154,30	

5.6.3 Sección 3121 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-36,40	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-173,00	694.517
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	298,40	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		153,70	

5.6.4 Sección 3121 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-37,10	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-172,30	704.859
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	296,60	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		152,80	

5.6.5 Sección 3121 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-34,40	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-174,90	667.404
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	303,90	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		156,10	

5.6.6 Sección 3121 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-36,60	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-172,80	697.452
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	298,00	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		153,40	

5.6.7 Sección 3121 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-38,20	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-171,30	719.976
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	293,80	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		151,60	

5.6.8 Sección 3121 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,05	-35,10	
Riego de adherencia					
AC 32 base G	7.000	0,33	0,07	-174,20	677.233
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	301,90	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		155,20	

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 572.678 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura PA16 por las alternativas estudiadas:

3121	T 31	E 2	con PA16	
	Modulo (Mpa)	N		
PA 16 (4cms)	4.000	572.678		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	687.248	114.570	20,01%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	694.517	121.839	21,28%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	704.859	132.181	23,08%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	667.404	94.726	16,54%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	697.452	124.774	21,79%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	719.976	147.298	25,72%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	677.233	104.555	18,26%

- En todos los casos la capa base AC 32 base G es la que fallaría.
- En todos los casos se mejora la vida útil del firme.
- Dependiendo de la alternativa esta mejora puede variar entre un 16 a 25% aprox.

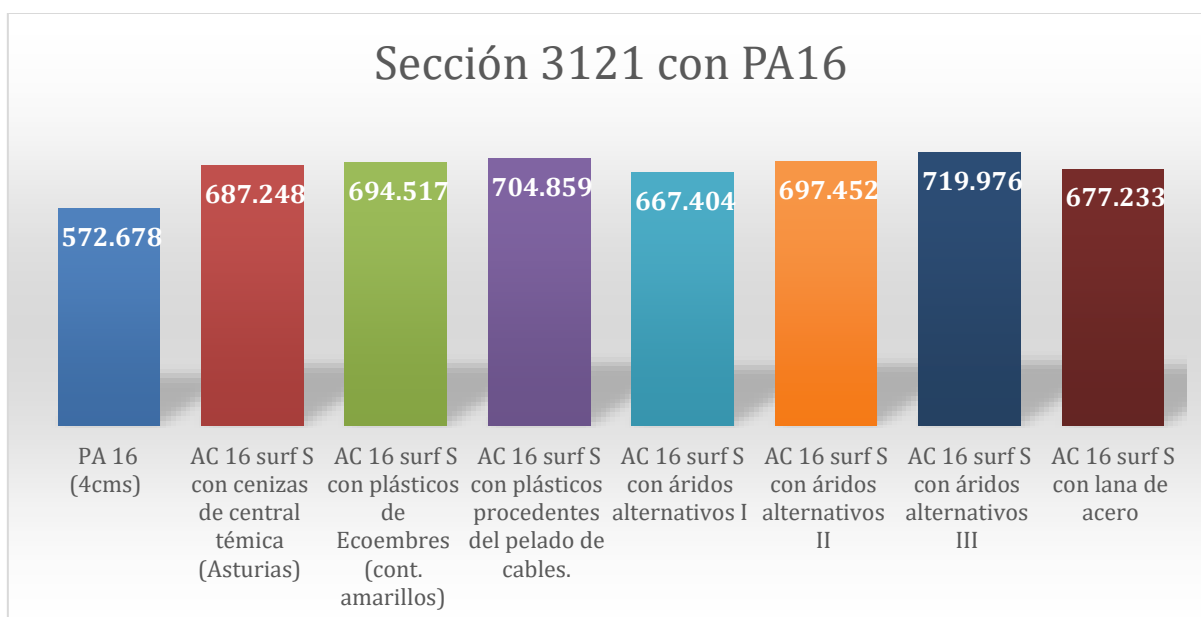


Tabla 5.6: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 3121 con PA16

5.7 Sección 3121 con AC 16 tipo:

5.7.1 Sección 3121 con AC16 convencional

		3121	T 31	E 2	con AC16
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S	6.135	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-175,40	660.494
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICAL	300	0,35	0,40	304,90	4.056.964
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		156,50	14.376.483

5.7.2 Sección 3121 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-173,70	684.367
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICAL	300	0,35	0,40	300,40	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		154,50	

5.7.3 Sección 3121 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillo)	6.846	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-173,00	694.517
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICAL	300	0,35	0,40	298,60	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		153,70	

5.7.4 Sección 3121 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-172,20	706.352
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	296,50	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		152,80	

5.7.5 Sección 3121 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-175,40	660.494
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	305,10	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		156,60	

5.7.6 Sección 3121 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-172,80	697.452
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	298,10	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		153,50	

5.7.7 Sección 3121 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-171,10	723.049
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	293,30	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		151,40	

5.7.8 Sección 3121 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,06	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-174,60	671.594
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,40	302,70	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		155,50	

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 660.494 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura AC 16 por las alternativas estudiadas:

3121	T 31	E 2	con AC16	
	Modulo (Mpa)	N		
AC 16 surf S (6cms)	6.135	660.494		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	684.367	23.873	3,61%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	694.517	34.023	5,15%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	706.352	45.858	6,94%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	660.494	-	0,00%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	697.452	36.958	5,60%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	723.049	62.555	9,47%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	671.594	11.100	1,68%

- En todos los casos la capa base AC 22 bin S es la que fallaría.
- En todos los casos se mejora la vida útil del firme.
- Dependiendo de la alternativa esta mejora puede variar entre un 0 a 9% aprox.

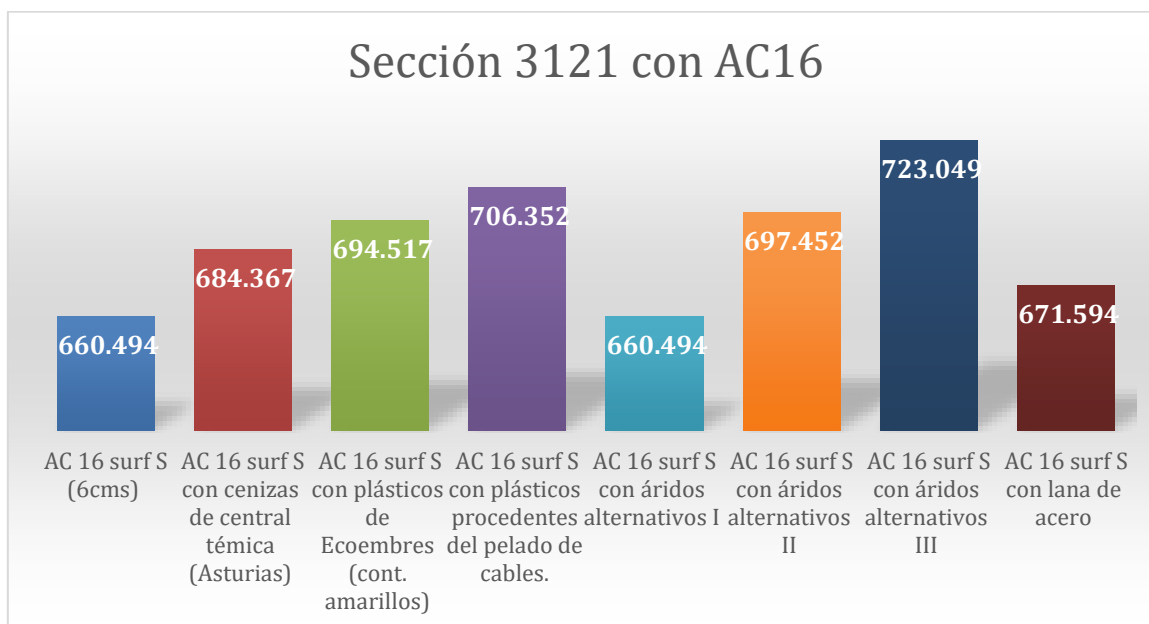


Tabla 5.7: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 3121 con AC16

5.8 Sección 3221 tipo:

5.8.1 Sección 3221 con AC16 convencional

	3221	T 32	E 2	
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶
AC 16 surf S	6.135	0,33	0,05	valor positivo
Riego de adherencia				
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-192,10
Riego de imprimación				
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	347,20
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		182,50

5.8.2 Sección 3221 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-190,40	489.720
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	342,20	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		180,20	

5.8.3 Sección 3221 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillo)	6.846	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-189,70	496.340
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	340,20	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		179,30	

5.8.4 Sección 3221 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-188,90	504.047
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	337,80	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		178,20	

5.8.5 Sección 3221 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-191,90	475.908
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	346,90	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		182,40	

5.8.6 Sección 3221 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-189,50	498.253
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	339,60	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		179,00	

5.8.7 Sección 3221 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-187,70	515.894
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	334,20	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		176,60	

5.8.8 Sección 3221 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,05	valor positivo	no rompe
Piego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,10	-191,20	482.291
Piego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,35	344,80	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		181,40	

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 474.105 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura AC 16 por las alternativas estudiadas:

<u>3221</u>	<u>T 32</u>	<u>E 2</u>		
	Modulo (Mpa)	N		
AC 16 surf S	6.135	474.105		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	489.720	15.615	3,29%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	496.340	22.235	4,69%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	504.047	29.942	6,32%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	475.908	1.803	0,38%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	498.253	24.148	5,09%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	515.894	41.789	8,81%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	482.291	8.186	1,73%

- En todos los casos la capa base AC 22 bin S es la que fallaría.
- En todos los casos se mejora la vida útil del firme.
- Dependiendo de la alternativa esta mejora puede variar entre un 0 a 9% aprox.

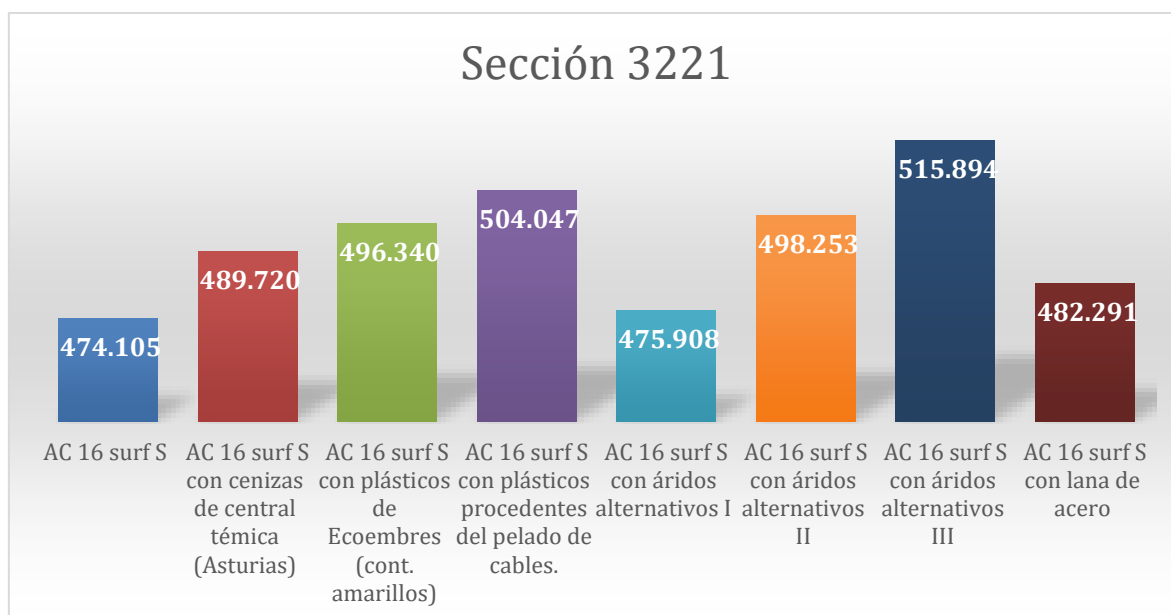


Tabla 5.8: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 3221

5.9 Sección 4121 tipo:

5.9.1 Sección 4121 con AC16 convencional

		4121	T 41	E 2	
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S	6.135	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-292,40	102.500
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	567,70	440.608
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		292,70	8.490.581

5.9.2 Sección 4121 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-290,60	104.834
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	561,30	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		289,90	

5.9.3 Sección 4121 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillo)	6.846	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-289,80	105.893
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	558,70	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		288,70	

5.9.4 Sección 4121 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-288,90	107.100
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	555,50	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		287,30	

5.9.5 Sección 4121 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-292,30	102.628
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	567,30	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		292,50	

5.9.6 Sección 4121 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Riego de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-289,60	106.160
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	557,90	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		288,40	

5.9.7 Sección 4121 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Pieigo de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-287,70	108.738
Pieigo de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	550,90	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		285,30	

5.9.8 Sección 4121 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,04	valor positivo	no rompe
Pieigo de adherencia					
AC 22 bin S	7.000	0,33	0,06	-291,50	103.659
Pieigo de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,30	564,60	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		291,30	

Los cálculos nos indican que en la sección analizada fallaría la capa base aprox. al paso de 102.500 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura AC 16 por las alternativas estudiadas:

<u>4121</u>	<u>T 41</u>	<u>E 2</u>		
	Modulo (Mpa)	N		
AC 16 surf S	6.135	102.500		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	104.834	2.334	2,28%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	105.893	3.393	3,31%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	107.100	4.600	4,49%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	102.628	128	0,12%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	106.160	3.660	3,57%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	108.738	6.238	6,09%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	103.659	1.159	1,13%

- En todos los casos la capa base AC 22 bin S es la que fallaría.
- En todos los casos se mejora la vida útil del firme.
- Dependiendo de la alternativa esta mejora puede variar entre un 0 a 6% aprox.

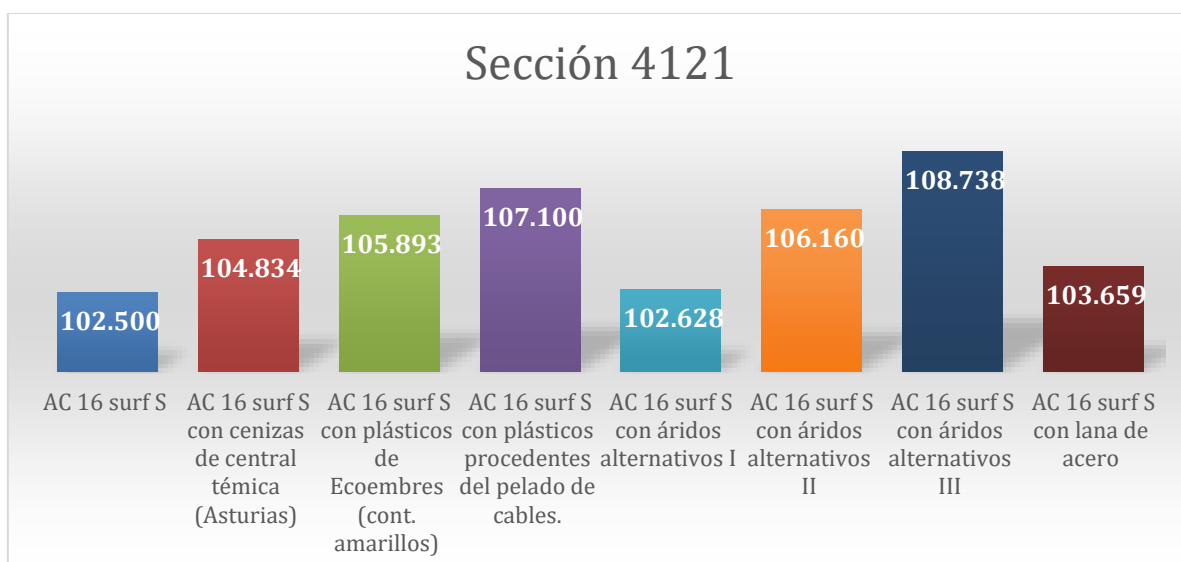


Tabla 5.9: Ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio de las capas del firme analizadas en la sección 4121

5.10 Sección 4221 tipo:

5.10.1 Sección 4221 con AC16 convencional

		4221	T 42	E 2	
	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S	6.135	0,33	0,05	-483,40	16.397
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	954,10	68.989
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		480,20	1.172.032

5.10.2 Sección 4221 con AC16 con ceniza de central térmica (Asturias)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	0,33	0,05	-466,80	16
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	941,60	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		477,20	

5.10.3 Sección 4221 con AC16 con plásticos de Ecoembres (contenedor amarillo)

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillo)	6.846	0,33	0,05	-460,20	345
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	936,40	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		475,90	

5.10.4 Sección 4221 con AC16 con plásticos procedentes del pelado de cables

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10⁻⁶	N
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	0,33	0,05	-452,20	272
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	930,20	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		474,20	

5.10.5 Sección 4221 con AC16 con áridos alternativos I

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	0,33	0,05	-482,30	563
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	953,30	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		480,10	

5.10.6 Sección 4221 con AC16 con áridos alternativos II

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	0,33	0,05	-458,10	714
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	934,90	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		475,40	

5.10.7 Sección 4221 con AC16 con áridos alternativos III

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	0,33	0,05	-440,50	4.148
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	920,70	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		471,70	

5.10.8 Sección 4221 con AC16 con lana de acero

	Modulo (Mpa)	Nu	espesor (m)	Deformación * 10 ⁻⁶	N
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	0,33	0,05	-475,30	396
Riego de imprimación					
ZAHORRA ARTIFICIAL	300	0,35	0,25	948,00	
SUELO SELECCIONADO	120	0,35		478,80	

Los cálculos nos indican que en la sección tipo analizada fallaría la capa de rodadura aprox. al paso de 16.397 ciclos de ejes de 13t de vehículo pesado medio.

En caso de sustitución de la capa de rodadura AC 16 por las alternativas estudiadas:

<u>4221</u>	<u>T 42</u>	<u>E 2</u>		
	Modulo (Mpa)	N		
AC 16 surf S	6.135	16.397		
AC 16 surf S con cenizas de central térmica (Asturias)	6.632	16	-	16.381 -99,90%
AC 16 surf S con plásticos de Ecoembres (cont. amarillos)	6.846	345	-	16.052 -97,90%
AC 16 surf S con plásticos procedentes del pelado de cables.	7.113	272	-	16.125 -98,34%
AC 16 surf S con áridos alternativos I	6.166	563	-	15.834 -96,57%
AC 16 surf S con áridos alternativos II	6.912	714	-	15.683 -95,65%
AC 16 surf S con áridos alternativos III	7.528	4.148	-	12.249 -74,70%
AC 16 surf S con lana de acero	6.373	396	-	16.001 -97,58%

Los resultados obtenidos no son válidos.

6. CONCLUSIONES

Para las secciones analizadas con categoría de tráfico **T00, T0 y T1**, con intensidades medias diarias de vehículos pesados superiores a 2.000 vehículos pesados, el empleo de las mezclas analizadas no mejora con respecto a la mezcla convencional la vida útil de la carretera, pero sus resultados si son válidos y se pueden disponer en ellas, además aporta un valor ecológico importante.

En las secciones analizadas con categoría de tráfico **T2, T31, T32 y T41**, con intensidades medias diarias de vehículos pesados entre 800 y 50 vehículos, el empleo de las mezclas analizadas mejora la vida útil de la carretera además del valor ecológico que supone la reutilización de los materiales reciclados.

La mezcla analizada que mejor resultado ha obtenido de porcentaje de mejora relativa en las secciones con categoría de tráfico **T2, T31, T32 y T41**, ha sido en la que se reemplaza árido natural por escorias de horno de arco eléctrico y material de fresado, empleándose betunes modificados con caucho con ceras.

En cambio, cuando la mezcla sostenible ha sido constituida por escorias de arco eléctrico y material de fresado, con solamente un rejuvenecedor, es cuando el incremento en el número de ejes tipo resistido es más bajo.

También es reseñable, los resultados de mejora obtenidos con las mezclas bituminosas a las que se les han añadido plásticos procedentes del pelado de cables o procedentes de Ecoembes.

En las secciones con categoría de tráfico **T2 y T31**, donde se puede construir con capa de rodadura de mezcla bituminosa AC ó PA, la mejora de cada una de las mezclas analizadas con respecto a sus correspondientes mezclas convencionales es mayor en el caso de las mezclas PA; aunque en términos relativos son similares, alcanzando en algunos casos 4,9 millones de ejes tipo.

En la sección de firme analizada para una categoría de tráfico pesado **T42**, no se ha podido obtener resultados fehacientes, considerándose que el empleo de estos materiales en firmes con una sola capa de pavimento, capa de rodadura sobre zahorra sin riego de adherencia, no es muy recomendable; en todo caso se pueden disponer en zonas peatonales, pero no para el paso de vehículos pesados. Esta sección de firme tiene una base granular sin tratar de zahorra, a la cual no se le añade un riego de adherencia y por lo tanto el número de ejes tipo resistido es muy bajo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Informe Bruntland, publicado en 1987.

Conferencia de Menendez Sebastián, E.M. “La carta del medio ambiente: la importancia del desarrollo sostenible” en Revista General de Derecho Administrativo”, (2006)

Cumbre de la tierra, Rio de Janeiro en 1992

Tratado de la Unión Europea firmado en Maastricht el 7 de febrero de 1992.

Web sostenible.com ; modelo de Economía Circular

Normativa Europea sobre reciclaje y gestión de residuos, febrero 2018

Sección tipo de carretera, autor: Carlos Real.

Norma 6.1 IC “Secciones de firme”, (2003).

Carlos Kraemer, et al. , Ingeniería de Carreteras (Volumen II), MacGraw-Hill Interamericana, Madrid, (2004).

Carlos Kraemer, ponencia congreso “Evaluación técnico-económico de las secciones de firme de la norma 6.1 IC”, (2004).

Miguel Ángel Calzada y Ángel Vega, “Anotaciones Básicas de Caminos: Firmes de Carreteras”, (2013).

Miguel Ángel Calzada y Ángel Vega, “Anotaciones Básicas de Caminos: Introducción a la Ingeniería de Tráfico”, (2013).