

**IAG454-07-2013**  
**DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA LA OPTIMIZACIÓN**  
**DE SECCIONES DE FIRMES**  
**DESENVOLVIMENTO DE NOVAS TECNOLOGIAS PARA A**  
**OPTIMIZAÇÃO DE SECÇÕES DE FIRMES.**

CARLOS MARTÍN PORTUGUES  
ACCIONA Infraestructuras  
Madrid, España  
carlos.martinportugues.montoliu@acciona.com

ANDREA CASAS OCAMPO  
ACCIONA Infraestructuras  
Madrid, España  
andrea.casas.ocampo@acciona.com

ELENA SAEZ CABALLERO  
ACCIONA Infraestructuras  
Madrid, España  
elena.saez.caballero@acciona.com

## **Resumen**

Durante los últimos años, ACCIONA Infraestructuras ha investigado en el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de optimizar las secciones de firmes, con el fin de reducir el volumen de recursos naturales necesarios para la construcción de los proyectos de infraestructura vial, disminuir los consumos energéticos y minimizar los costes asociados a la ejecución de este tipo de estructuras. La primera tecnología se basa en un nuevo proceso de estabilización de suelos mediante el uso de dos nuevos productos, capaces de incrementar la cohesión de las partículas del suelo y reducir significativamente la susceptibilidad al agua de los materiales tratados. La segunda tecnología, es el desarrollo de mezclas asfálticas de elevado módulo, caracterizadas por tener un comportamiento a fatiga superior a las mezclas convencionales y por tanto una mejor resistencia al envejecimiento, debido al uso de nanomateriales o residuos plásticos. Estas investigaciones se han basado en un amplio estudio experimental, así como en el desarrollo de modelos de simulación, en los que se han integrado los resultados obtenidos en las dos líneas desarrolladas. Los resultados determinaron que el uso de estas dos tecnologías en la sección analizada, permitía reducir 8 cm el paquete de firme y 30 cm la explanada. Esta reducción puede significar un ahorro de costes en la construcción de la sección entre un 10% y un 12% en función de las características del proyecto y de la vía. Estas reducciones solo aplican para la sección modelada y según las características descritas en el estudio.

## **Resumo**

Durante os últimos anos, ACCIONA Infraestruturas tem investigado o desenvolvemento de novas tecnoloxías capaces de optimizar as seccións dos pavimentos asfálticos, con o objetivo de reducir o

volumen de recursos naturales para la construcción de proyectos de infraestructuras viarias, disminuir los consumos energéticos y minimizar los costos asociados a la ejecución de este tipo de estructuras. La primera tecnología se basa en un nuevo proceso de estabilización de suelo mediante el uso de productos, capaces de incrementar la cohesión de las partículas del suelo y reducir significativamente la susceptibilidad al agua de los materiales tratados.

La segunda tecnología consiste en el desarrollo de mezclas asfálticas con un elevado módulo, caracterizadas por tener un comportamiento a fatiga superior relativamente a las mezclas convencionales y por eso, mayor resistencia al envejecimiento debido al uso de nanomateriales o residuos plásticos. Estas investigaciones se basan en un amplio estudio experimental, así como, en el desarrollo de modelos de simulación en los que se integraron los resultados obtenidos en las líneas de investigación. Los resultados determinaron que el uso de estas tecnologías en la sección analizada permitirá reducir 8 cm de la sección del pavimento asfáltico y 30 cm en suelo. Esta reducción puede significar un ahorro de costos en la construcción de esta sección de pavimento entre un 10% y un 12% en función de las características del proyecto y de la vía. Estas reducciones solo se aplican para una sección simulada y según las características descritas en este estudio.

## INTRODUCCIÓN

Para que las carreteras puedan contribuir a un desarrollo más sostenible del conjunto de la sociedad, es necesario innovar en materiales y procedimientos que permitan optimizar sus procesos constructivos, fases de conservación y mantenimiento. Estas modificaciones deben estar orientadas al desarrollo de nuevas tecnologías capaces de minimizar el consumo elevado de recursos naturales, reducir los impactos ambientales asociados y cumplir con los requerimientos exigidos a nivel mundial en la construcción de estos proyectos.

Las secciones del firme y la explanada son las estructuras más relevantes en este tipo de proyectos, razón por la cual, los materiales que las constituyen deben cumplir con parámetros y especificaciones técnicas muy exigentes. Sin embargo, aun utilizando las tecnologías existentes en la actualidad, es inevitable que con el paso del tiempo estas estructuras se degraden debido a factores activos y pasivos como la calidad de los materiales utilizados, espesores y procesos de ejecución, radiación solar, variaciones diarias y estacionales de temperatura, inundaciones y heladas; los cuales someten a las carreteras a una serie de agresiones que afectan su durabilidad. Estos factores no siempre se consideran en el dimensionamiento del firme y de la explanada, pero su efecto puede tener especial importancia en su deterioro, ya que benefician la pérdida de su capacidad portante, la fisuración por esfuerzos térmicos, o la fisuración y degradación superficial por efecto del hielo.

El principal problema generado en las explanadas, se debe a las fluctuaciones de humedad que sufren estas estructuras a lo largo de su vida útil. La excesiva humedad en invierno y la extrema sequedad en verano, pueden producir una variación en el volumen del suelo que constituye la explanada, generando elevaciones y depresiones en la superficie de la vía, el cuarteo de las capas del firme, el levantamiento irregular de la superficie de la carretera o incluso, producir el fallo completo de la estructura. En el caso de los firmes, los deterioros pueden generarse por deformaciones que pueden aparecer en forma de rodillos, hundimientos, blandones, ondulaciones y huellas; por roturas que se presentan en forma de fisura o piel de cocodrilo; o por

desprendimientos que pueden generar baches, debido a una adhesión poco consistente entre el árido y el betún.

Durante décadas, la estabilización de suelos a nivel mundial se ha realizado con diferentes estabilizadores tradicionales como el cemento y aunque su eficacia está ampliamente demostrada, la susceptibilidad al agua de los materiales tratados, sigue siendo un factor influyente en su durabilidad. Por ello, la tecnología planteada en este documento presenta una mejora incluso a técnicas ampliamente probadas, no solo en amplitud de aplicación, reducción de permeabilidad o durabilidad, sino en ahorro de materiales y costes de ejecución.

En cuanto a las mezclas bituminosas, es importante destacar que la principal evolución que han tenido los materiales empleados en los últimos 25 años, ha sido la utilización de betunes modificados con polímeros, pero el material base sigue siendo el mismo, betunes provenientes del residuo de destilación del petróleo. Las mezclas de alto módulo (MAM) actualmente disponibles en el mercado, se fabrican empleando betunes de baja penetración o bien modificados con elevados porcentajes de polímero y como consecuencia de elevado precio. Su uso, supone una serie de beneficios medioambientales muy claros, asociados a una menor necesidad de materiales vírgenes (áridos y betún) y a la reducción de los consumos energéticos y emisiones.

Las tecnologías detalladas en este documento, se han basado en el estudio de nuevos productos capaces de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos a través de un proceso de estabilización e impermeabilización y la obtención de mezclas asfálticas de prestaciones mejoradas y elevado módulo mediante el desarrollo de mezclas aditivadas con nanomateriales y residuos plásticos. Con los resultados obtenidos, se determinaron las posibles reducciones de espesores que se podrían alcanzar mediante la utilización de estos materiales en las secciones de firmes y consecuentemente, se estimaron los ahorros económicos asociados a estas nuevas tecnologías.

## **DESCRIPCIÓN TÉCNICA**

### **Nueva tecnología para el tratamiento de suelos**

La tecnología desarrollada plantea el uso de dos productos de origen polimérico, los cuales mejoran y/o incrementan las propiedades mecánicas de los suelos tratados, basando su funcionamiento en dos aspectos fundamentales: aumentar la cohesión entre las partículas del suelo y minimizar su permeabilidad, generando un material hidrófobo. Este nuevo tratamiento es aplicable en cualquier tipo de suelo, lo que permite dar utilidad a aquellos materiales que en la actualidad son descartados debido a sus características fisicoquímicas y/o mecánicas. Además, los dos productos son ambientalmente inocuos y no son tóxicos ni perjudiciales para la salud, por lo que pueden ser aplicados incluso en zonas ambientalmente sensibles.

Una de las razones principales de la efectividad de esta tecnología, es la impermeabilización. Con este tratamiento, los suelos además de incrementar su cohesión y resistencia, se convierten en un material hidrófobo, por lo que los efectos generados en las estructuras debido a los ciclos de humedad-sequedad y hielo-deshielo, se minimizan radicalmente. El grado de impermeabilización, se obtiene en función de las dosificaciones, por lo que puede controlarse

dependiendo las características del tratamiento. Otra ventaja radica en que los productos no tienen interacción con elementos químicos presentes comúnmente en el suelo como materia orgánica y/o sales solubles, que en función de su concentración, pueden convertirse en un factor limitante para el tratamiento del suelo con estabilizadores tradicionales.

En el estudio se realizó una comparativa entre suelos tratados y sin tratar, estableciendo inicialmente una dosificación óptima para cada uno de los productos. Como se referenció anteriormente, un producto incrementa la cohesión de las partículas de suelo y el otro minimiza su permeabilidad; por ello, fue necesario realizar ensayos de laboratorio en diferentes tipos de suelo, con el fin de determinar la mejor dosificación en función de dos parámetros: las mejoras técnicas obtenidas (incremento en la resistencia del suelo y reducción en la absorción de agua e hinchamiento) y el coste económico de la aplicación. El objetivo, era obtener una nueva tecnología económicamente rentable y por ende, competitiva en el mercado actual. La dosificación óptima se determinó en función del peso seco del suelo, siendo para el producto polimérico que incrementa la cohesión, entre el 0.3% y 0.6% y para el polímero que genera la impermeabilización entre el 0.05% y 0.07%. No siempre se aplica la misma dosificación del polímero que aporta cohesión; dentro del rango establecido, en suelos cohesivos la cantidad es menor que en suelo granulares, a diferencia del polímero impermeabilizante, cuya cantidad a aplicar varía solo en función del grado de impermeabilización que se desee.

Una vez determinadas las dosificaciones óptimas y con el fin de determinar su eficacia en diferentes tipos de suelo, se realizaron nuevos ensayos de laboratorio. Los suelos utilizados en este estudio han sido clasificados de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) de España. Para la ejecución de los ensayos, se tuvo en cuenta la siguiente normativa española.

- Materia orgánica según la norma UNE1032041
- Porcentaje de sales solubles según la norma NLT 114.
- Distribución del tamaño de partículas según norma UNE 103101-95 (ASTM D422-63)
- Humedad natural: según norma UNE 103300-93
- Límites de Atterberg según las normas UNE 103104-93 para el límite líquido y UNE 103103-94 para el límite plástico. (ASTM D4318-10)
- Proctor modificado según la norma UNE 103501-94, (ASTM D1557-10).
- Determinación del índice de CBR según norma UNE 103502-95, (ASTM D1883-07).

A continuación se presentan los resultados obtenidos tanto en la clasificación de los suelos tratados como en los resultados de laboratorio.

**Tabla 1: Resultados ensayos de clasificación según PG-3**

Suelo	%Finos (0,080 mm)	% Materia Orgánica	% Sales Solubles	(LL)	Índice de Plasticidad (IP)
1	35%	0,33%	0,17%	37,8	16,9
2	43,9	0,5	1,2	42	22,7
3	30,7	0,3	0,2	23,1	7,3
4	26	0,19	0,18	-	NP

El interés de tratar diferentes materiales desde el punto de vista físico y químico, era evaluar por un lado si existía interacción entre los polímeros y los diferentes componentes del suelo, como la materia orgánica y las sales solubles, y por otro, si parámetros como el Índice de Plasticidad y el porcentaje de finos eran un limitante para la efectividad de este tratamiento.

La normativa española utilizada para la clasificación de los suelos ha sido el PG-3 y para el diseño de las secciones de firmes la norma 6.1 IC Secciones de Firmes, de la Instrucción de Carreteras Española. En la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos realizados, así como la clasificación de los suelos antes y después de su tratamiento.

**Tabla 2: Resultados de ensayos mecánicos**

Suelo	Suelo sin tratamiento			Suelo tratado		
	CBR	Hinchamiento	Absorción de agua	CBR	Hinchamiento	Absorción de agua
1	10,5	1,83	3,5	53,5	0,12	0,5
2	2,9	4,3	5,8	12,9	1,01	2,2
3	8,5	1,3	3,7	19,1	0,4	0,95
4	13,4	2,9	3,2	49,5	0,5	1

Los resultados obtenidos determinaron que los suelos tratados incrementan drásticamente su Índice de CBR en porcentajes superiores al 100%; el hinchamiento se reduce mínimo un 69% y la absorción de agua un 62%. El incremento de la resistencia del suelo, es una consecuencia de la reducción que tiene el material tratado a la susceptibilidad al agua. Al limitar la cantidad de agua que entra en contacto con el suelo tratado, se garantiza la estabilidad de la capa estabilizada. Es importante destacar que estos ensayos se han realizado en inmersión, es decir, en condiciones de saturación. Finalmente, es importante destacar que las mejoras obtenidas en los suelos tratados, han permitido evaluar secciones más exigentes, así como determinar la posible reducción de espesores del paquete de firme.

### **Desarrollo de nuevas Mezclas de Alto Modulo (MAM)**

El comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas convencionales, se puede considerar satisfactorio en la mayoría de los casos; sin embargo, desde hace algún tiempo, las exigencias a las que se someten las carreteras son cada día más elevadas, debido al aumento en la carga de los vehículos y la densidad de tráfico, y a la necesidad de una mayor durabilidad y mejora en el confort y seguridad de los pavimentos. Esta situación hace recomendable la búsqueda de materiales más resistentes.

Una solución a los problemas mencionados es el uso de mezclas asfálticas modificadas. Estos materiales proporcionan mayor resistencia, ya que son capaces de incrementar la resistencia a la deformación permanente, en condiciones de temperatura elevada, así como la resistencia a la fractura a bajas temperaturas, sin afectar las propiedades mecánicas.

Hasta la fecha, como aditivos se han utilizado diferentes compuestos poliméricos, tales como polibutadieno, poliisopreno, gomas naturales, copolímeros de estireno-butadieno, etc. Sin embargo, el alto precio de estos productos, limita la concentración del polímero y encarece el precio final del betún modificado, lo que implica un aumento en el precio final de la mezcla. A pesar de que este hecho se ha detectado hace tiempo, el avance tecnológico respecto a la modificación de betunes y mezclas asfálticas no ha continuado, quedándose estancado en la modificación con polímeros. Así pues, se considera necesario seguir avanzando técnicamente en la modificación de los materiales bituminosos, con objeto de obtener firmes con mayores prestaciones y más duraderos. La utilización de nanomateriales y residuos plásticos de diferente origen, es una alternativa a la utilización de estos polímeros, para obtener betunes y mezclas asfálticas de propiedades mejoradas, permitiendo así reducir espesores de capas de mezclas asfálticas.

Para estudiar el comportamiento de las nuevas mezclas asfálticas, se ha llevado a cabo un análisis de las propiedades mecánicas de este tipo de materiales y para ello se han realizado los ensayos de diseño y caracterización que exige la normativa vigente tanto a nivel español como europeo. La principal diferencia de las mezclas asfálticas denominadas de alto módulo con las mezclas convencionales, se debe al aporte de residuos plásticos y nanomateriales en tamaño y granulometría óptima, para su incorporación en mezclas asfálticas. Para ello, se evaluaron diferentes porcentajes de aditivo sobre el peso de los áridos (residuos de plástico entre 0,5% y 2% y nanomateriales entre 0,3% y 1%). La dosificación de dichos materiales se realizó por vía seca y los residuos poliméricos seleccionados fueron polietileno PE, Polipropileno PP, poliestireno PS y Neumáticos fuera de uso. La selección de estos materiales se debe a su gran disponibilidad, al coste por tonelada (con el objetivo de no encarecer la mezcla bituminosa) y a propiedades como elasticidad y durabilidad que le dan a la mezcla asfáltica prestaciones mejoradas. Para llevar a cabo el estudio, diseño y caracterización de las mezclas asfálticas, se han realizado los ensayos exigidos por la normativa española (PG-3) y europea (Marcado CE). Las normas utilizadas han sido las siguientes:

- Determinación de densidades aparentes según norma UNE 12697 – 6 (ASTM D3549)
- Huecos en mezcla según norma UNE 12697- 30 (ASTM D6926)
- Huecos en áridos según norma UNE 12697- 8 (ASTM D3202)
- Ensayo de sensibilidad al agua según norma UNE 12697 – 12 (ASTM D3625 - D4867)
- Ensayo de pista de laboratorio o rodadura según norma UNE 12697-22 (AASHTO TP 63)

Además se llevó a cabo la caracterización dinámica de las mezclas con el objetivo de analizar el comportamiento de los materiales bituminosos en una sección de firmes habitual, implantada en carreteras a nivel nacional.

- Determinación de Módulos de rigidez según norma UNE 12697-26 (ASTM D4123)
- Definición de la ley de fatiga a 4 puntos según norma UNE 12697-24 (AASHTO TP8)

A continuación se presentan los resultados más característicos de cada mezcla bituminosa desarrollada, primero se representan las mezclas modificadas con residuos poliméricos y luego por las modificadas con nanomateriales.

**Tabla 4: Resultados de los ensayos de la mezcla 16 surf B50/70 S modificada con residuos poliméricos**

AC 16 surf B50/70 S	REF	PE	PS	PP	ELT's
Ligante / mezcla	4.7 %	4.7 %	4.7 %	4.7 %	4.7 %
Sensibilidad al agua (%)	92.2 %	89.4 %	90.1 %	94.2%	93.3 %
Ensayo de Rodadura <0.10MM/1000charge cycles	0.081	0.048	0.039	0.04	0.066
Módulos de rigidez (Mpa)	8011	11.033,00	12.801,00	8.671,00	11.665,00

**Tabla 5: Resultados de los ensayos de la mezcla 16 surf B50/70 S modificada con nanomateriales**

AC 16 surf B50/70 S	REF	Nanoclays	CarbonBlack
Ligante / mezcla	5.1%	5.3%	5.1%
Sensibilidad al agua (%)	87.3%	90%	91.90%
Ensayo de Rodadura <0.10MM/1000charge cycles	0.065	0.043	0.076
Módulos de rigidez (Mpa)	7.816	9.647	10.163

Los resultados obtenidos hacen referencia a una mejora en el comportamiento a las deformaciones plásticas de las nuevas mezclas modificadas, concretamente aquellas modificadas con residuos plásticos y nanoarcillas. La mezcla modificada con Carbon black presenta iguales características que la mezcla de referencia, aunque cabe destacar que se han obtenido mejoras en los valores de módulos de rigidez, debido a su alto contenido en elementos antioxidantes que favorecen la durabilidad de las mezclas bituminosas.

## Optimización de firmes

Una vez concluido con los ensayos de diseño y caracterización de los materiales a evaluar, tanto de las mezclas asfálticas de elevado módulo, como la estabilización de materiales granulares se ha analizado una sección de firme semirigido típica y normalizada para firmes de carreteras. El objetivo de este estudio era evaluar el comportamiento de ambas tecnologías planteadas en este documento tanto para el tratamiento de suelos como para el desarrollo de nuevas mezclas de alto módulo. El procedimiento llevado a cabo consiste en el análisis de las tensiones y deformaciones mediante el software Alizé LCPC, como método de dimensionamiento de una sección convencional frente a una sección en la que se incorporen las tecnologías anteriormente expuestas.

Para el análisis, se ha considerado una categoría de explanada tipo E1 la cual se caracteriza por tener un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga superior a 60 MPa y una categoría de tráfico tipo T2. Por todo ello y además teniendo en cuenta una sección configurada por zahorra artificial, la sección elegida corresponde a la sección tipo 211 definida por la Normativa española 6.1 I.C, secciones de firme de la instrucción de carreteras. Dicha sección se define por estar configurada por 28 cm de mezcla bituminosa y 40 cm de Zahorra artificial.

Se han analizado los ejes equivalentes a los que va a estar sometida la sección a lo largo de su vida útil como intensidad media diaria de vehículos, a la cual se le aplican coeficientes de crecimiento y de seguridad de cargas mediante la expresión:

$$TEP = IMD_p \cdot CE \cdot 365 \cdot \left[ \frac{(1+c)^n - 1}{c} \right] \cdot \gamma_s \quad (1)$$

Dónde:

TEP= Tráfico equivalente de proyecto

IMDp = intensidad media diaria vehículos pesados

CE = factor de equivalencia

n = vida útil

$\gamma_s$  = coeficiente mayoración de cargas

c = crecimiento acumulativo anual

Además se ha analizado los ejes equivalentes que son capaces de resistir la estructura mediante característica dinámica de los materiales y leyes de fatiga, con objeto de relacionarlos entre si y determinar el coeficiente K, con objeto de que su valor este por encima de 1.01 para considerar una sección que sea capaz de comportarse en condiciones óptimas lo largo de su vida útil. En base a las consideraciones definidas anteriormente la sección de referencia y reflejada en la norma 6.1 I.C, quedaría definida de la siguiente manera:

SECCIÓN 211				
Capa	Denominación	Espesor (cm)	$\varepsilon$ ó $\sigma$ (Mpa)	N (nº de ejes)
Rodadura	BBTM11B	4	3,89E-05	182.275.448
Adherencia				
Intermedia	AC22S	10	2,62E-05	777.664.153
Adherencia				
Base	AC32G	14	1,04E-04	5.002.520
Adherencia				
Sub base	ZA	40	1,54E-04	46.517.671
Explanada	E1	Infinito	2,62E-04	6.982.224
Nº de ejes				5.002.520
Cálculo FS:				
K=		1,024	T-2	

**Figura 1: Sección 211. Norma 6.1 IC.**

Es importante tener en cuenta que el tipo de configuración de explanada E1, que se ha considerado son 60 cm de suelo adecuado sobre un suelo tolerable. Este dato servirá de referencia para la optimización del paquete de firme junto con la consideración de un tipo de mezcla bituminosa de alto modulo. De igual manera que la sección de referencia, se ha llevado a cabo el análisis y dimensionamiento de dos secciones optimizadas. El procedimiento consiste en optimizar la sección de referencia teniendo en cuenta la incorporación de una mezcla de alto modulo en capa base y un tipo de suelo estabilizado en la configuración de la explanada. Y la diferencia de una y otra se contempla en el espesor de la explanada. En la optimización nº1 se ha tenido en cuenta un espesor de explanada de 60 cm, el cual esta subdividido en 30 cm de suelo no tratado y en la coronación de la explanada 30 cm de suelo tratado o estabilizado. Y en la optimización N°2 se ha considerado 30 cm de espesor de explanada. En todo momento cumpliendo con la categoría E1 predefinida al inicio del análisis.



SECCIÓN 211. Optimización N°1				
Capa	Denominación	Espesor (cm)	$\epsilon$ ó $\sigma$ (Mpa)	N (n° de ejes)
Rodadura	BBTM11B	3	4,98E-05	73.610.521
Adherencia				
Intermedia	AC22S	7	3,40E-06	1.399.659.255.061
Adherencia				
Base	MAM	10	9,52E-05	5.773.759
Adherencia				
Sub base	ZA	35	1,73E-04	30.765.714
Explanada	E1	Infinito	2,90E-04	4.863.887
N° de ejes				4.863.887
Cálculo FS:				
		K=	1,022	T-2

**Figura 2: Sección 211. Optimización 1**

SECCIÓN 211. Optimización N°2				
Capa	Denominación	Espesor (cm)	$\epsilon$ ó $\sigma$ (Mpa)	N (n° de ejes)
Rodadura	BBTM11B	3	5,19E-05	63.255.079
Adherencia				
Intermedia	AC22S	7	3,90E-06	845.868.890.946
Adherencia				
Base	MAM	10	9,80E-05	5.190.966
Adherencia				
Sub base	ZA	40	1,74E-04	29.831.069
Explanada	E1	Infinito	2,97E-04	4.439.694
N° de ejes				4.439.694
Cálculo FS:				
		K=	1,016	T-2

**Figura 3: Sección 211. Optimización 2**

Como se puede apreciar en las tablas del análisis los ejes equivalentes de la Optimización son inferiores a la sección de referencia y a la sección optimizada N°1 pero cumplen perfectamente con los criterios de análisis y dimensionamiento siendo el coeficiente K superior a 1.01. Este análisis implica una reducción de 13 cm en la optimización N°1 y 38 cm en la optimización N°2.

## CONCLUSIONES

Los resultados planteados en este documento permiten obtener las siguientes conclusiones.

- El Índice de CBR de los suelos tratados se incrementa más del 100% en comparación con aquellos no tratados, independientemente de las propiedades de los suelos.
- El porcentaje de hinchamiento se reduce mínimo un 69% y el de absorción mínimo un 62%. Esta reducción se ve directamente reflejada en el incremento de la capacidad portante de los suelos tratados.
- El nuevo tratamiento de suelos es eficaz en cualquier tipo de suelo, independientemente de sus características químicas (porcentaje de materia orgánica y sales solubles) o físicas (porcentaje de finos, LL, e IP)
- La modificación de mezclas asfálticas mediante aditivos procedentes de residuos plásticos y nanomateriales, aportan una serie de mejoras en las propiedades mecánicas de las mezclas estudiadas. Estas mezclas bituminosas cumplen con las exigencias establecidas en la normativa vigente PG-3, según lo establecido en los artículos 542 y 543. Los

resultados del ensayo de sensibilidad al agua son favorables y además el ensayo de rodadura presenta mejoras respecto a la mezcla convencional de un 40% en el comportamiento frente a las deformaciones permanentes del firme.

- Las nuevas mezclas asfálticas desarrolladas presentan mejoras en las características dinámicas, reflejadas en los valores de módulo de rigidez y leyes de fatiga. Los valores de módulo de rigidez aumentan en un 35% aproximadamente como valor medio y las leyes de fatiga son similares a una mezcla convencional o incluso en ciertas mezclas suponen un mejor comportamiento, incrementando el número de ejes que es capaz de soportar la capa en la que se ha considerado la mezcla
- Debida a la aplicación de la tecnología desarrollada es posible reducir en 8 cm la sección de firme modelado en este estudio y 30 cm en la explanada. Esta reducción puede significar un ahorro de costes de construcción entre el 10% y 12% aproximadamente, en función de las características del proyecto y de la vía. Estas reducciones solo aplican para la sección modelada y según las características descritas.

## REFERENCIAS

- (1) Kraemer, C. y Albelda, R. (2004). Evaluación técnico-económica de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC
- NORMA UNE103204. Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico
- NORMA NLT 114. Determinación del contenido en sales solubles de los suelos
- NORMA UNE 103101-95. Análisis granulométrico de suelos por tamizado
- NORMA UNE 103300-93. Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa
- NORMA UNE 103104-93 Determinación del límite plástico de un suelo
- NORMA UNE 103103-94 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de casagrande.
- NORMA UNE 103501-94. Ensayo de compactación. Proctor modificado
- NORMA UNE 103502-95. Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo.
- NORMA UNE 12697 – 6. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad
- NORMA UNE 12697- 30. Preparación de la muestra mediante compactador de impactos
- NORMA UNE 12697- 8 Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas
- NORMA UNE 12697 – 12. Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa
- NORMA UNE 12697-22. Ensayo de rodadura
- NORMA UNE 12697-26. Rigidez
- NORMA UNE 12697-24. Resistencia a la fatiga