

IAG57-06-2013
COMPORTAMIENTO DE LOS FIRMES ASFÁLTICOS DE RODADURA
FABRICADOS CON NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU,s).
COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NA ESTRADA
FABRICADOS COM PNEUS USADOS.

José Simón Grau
CHM, Obras e Infraestructuras
Alicante, España
jsimon@chm.es

Tomás Bernal
Laboratorio CARM
Murcia, España
jesualdo.molina@carm.es

Jaime Ramis
Universidad de Alicante
Alicante, España
jramis@ua.es

Santiago Núñez Gutiérrez
Certio
Granada, España
snunez@certio.com

Francisco J. Barceló Martínez
Centro Tecnológico de Repsol
Madrid, España
fbarcelom@repsol.com

Julio López Ayerra
CTCON
Murcia, España
jlayerra@ctcon-rm.com

Resumen

Hace cinco años se ejecutaron tramos de prueba de firmes con NFU,s, utilizando las dos técnicas de aplicación (vía seca y húmeda) para comprobar su comportamiento en aspectos relacionados con la seguridad vial y el medioambiente; para ello se realizaron estudios experimentales divididos en dos grupos: Medio Ambiente: 1-Viabilidad prestacional de la reutilización de NFU,s en la fabricación de firmes asfálticos para rodadura mediante ensayos prestacionales y mecánicos. 2- Evaluación de la contaminación acústica mediante ensayos de medición de niveles de ruido generados por la superficie del firme. Seguridad Vial: 1- Estudio colorimétrico sobre la evolución

del color (tonalidad negra) de la superficie del firme realizado “in situ” y evaluando el contraste con las marcas viales horizontales. 2- Comportamiento de los firmes con NFU,s en relación con la resistencia al deslizamiento mediante medidas del CRD. Realizados los ensayos involucrados en los estudios experimentales, se pudo afirmar que la utilización de NFU,s en la fabricación de firmes asfálticos en capas de rodadura conlleva las siguientes ventajas: 1-Posibilidad de utilización de un residuo como es el caso de los NFU,s, sin tener que penalizar las prestaciones de los firmes. 2- Disminución de la contaminación acústica (ruido del tráfico). 3- Aumento de la resistencia al deslizamiento. 4- Mantenimiento de la tonalidad negra del firme más tiempo, mejorando el contraste de color con las marcas viales horizontales. Transcurridos cinco años de la realización de los tramos de prueba y de los estudios experimentales sobre el comportamiento de los firmes asfálticos con NFU,s, después de estar sometidos dichos tramos a la acción del tráfico intenso, se han repetido los estudios ensayos realizados anteriormente. La ponencia expone los resultados obtenidos transcurridos cinco años de la fabricación de los tramos de prueba y el estudio comparativo con los resultados anteriores.

Resumo

Cinco anos atrás, foi executado seções de teste com a empresa PNEUS, usando ambas as técnicas de aplicação (seca e úmida) para verificar seu comportamento em questões relacionadas com a segurança rodoviária e para o ambiente, pois dividir os estudos experimentais foram realizados em dois grupos: Ambiente: 1-viabilidade benefícios sociais da reutilização de PNEUS em empresa de fabricação de asfalto rolando por prestacionais e testes mecânicos. 2 - Avaliação do ruído através de ensaios de medição de níveis de ruído gerados pela superfície da estrada. Segurança Rodoviária: 1 - Estudo sobre a cor colorimétrica evolução (cor preta) da superfície da estrada feita "in situ" e avaliar o contraste com marcas rodoviárias horizontais. 2 - Comportamento da empresa com PNEUS em relação à resistência à derrapagem através de medições o coeficiente de resistência ao deslizamento. Ensaios conduzidos envolvido em estudos experimentais, foi dito que o uso do PNEUS firme no asfalto fabricação vestindo cursos tem as seguintes vantagens: 1-Possibilidade de utilização de resíduos como é o caso do PNEUS, sem penalizar o desempenho da firma. 2 - Redução da poluição sonora (ruído de tráfego). 3 - Aumento da resistência ao deslizamento. 4 - Manutenção da forte sombra preta por mais tempo, melhorando o contraste da cor com marcas rodoviárias horizontais. Depois de cinco anos após a conclusão das seções de testes e estudos experimentais sobre o comportamento de pavimentos asfálticos com PNEUS, após ter sido submetido à ação disse seções de tráfego pesado, os estudos foram repetidos testes antes. O trabalho apresenta os resultados obtidos após cinco anos de fabricação das seções de teste e estudo comparativo com os resultados anteriores.

INTRODUCCION

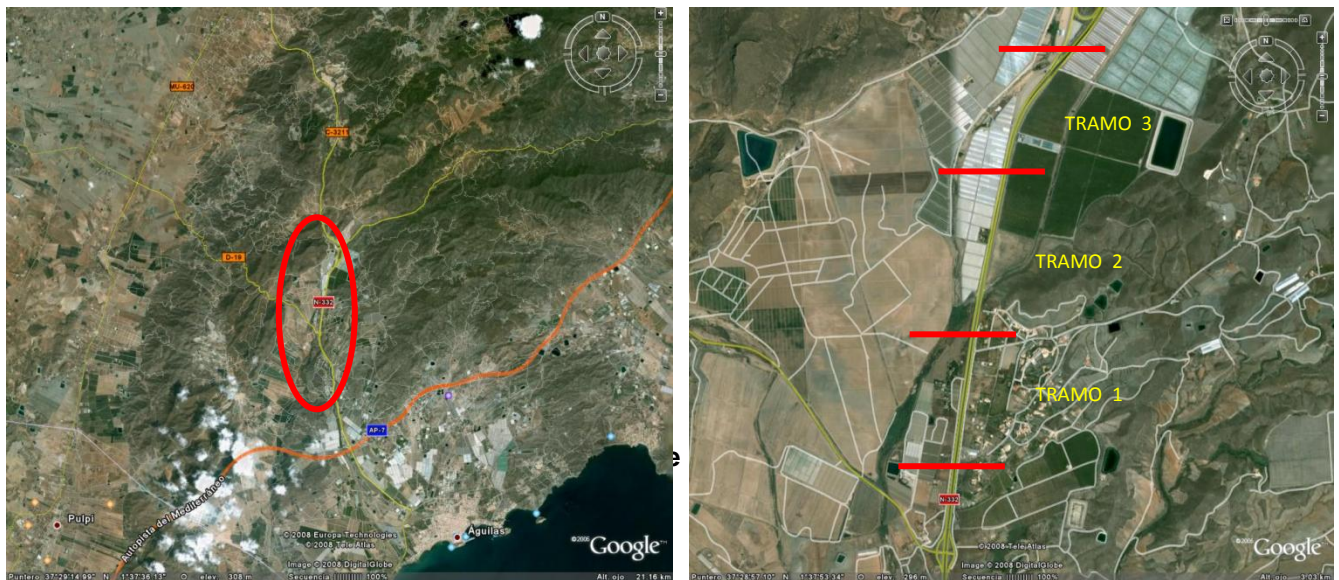
A partir de la entrada en vigor de la Orden Circular OC 24/2008 en España, una de las medidas llevadas a cabo por el sector de la carretera es la utilización de polvo de neumático fuera de uso (PNFU's); para su reutilización en mezclas asfálticas y contribuir al desarrollo sostenible y mejora del medio ambiente. En junio de 2007 se realizaron unos tramos de prueba utilizando PNFU,s obteniéndose unos resultados que se plasmó en el artículo técnico “Comportamiento de los firmes asfálticos fabricados con neumáticos usados (PNFU's)” editado en la Revista

Carreteras nº 174, nov. 2010, donde dimos a conocer la fabricación y puesta en obra de un tramo de prueba de una mezcla tipo F-10 (BBTM11A) con betún modificado convencional tipo BM-3c (PMB45/80-65) y dos tramos con betún y adición PNFU's, uno por vía seca y otro por vía húmeda.

En esta ponencia, pretendemos hacer un seguimiento de la obra trascurridos unos cinco años desde su puesta en servicio, para comprobar su estado y la evolución de los parámetros con el paso del tiempo y comparar los resultados con los obtenidos inicialmente. El tiempo transcurrido entre la puesta en obra y el seguimiento es desde Junio/2007 a Noviembre/2012.

CHM Obras e infraestructuras, ha realizado un proyecto de I+D+i certificado por AENOR con nº 068/07337/08 relacionado con el uso de PNFU con título “**Estudio del comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente para viales fabricados con PNFU (vía seca y vía húmeda – NEUMAVIA)**”, donde después de los estudios preliminares en laboratorio se han ejecutado tramos de prueba de firmes con PNFU, utilizando las dos técnicas de aplicación (vía seca y húmeda), y un tramo sin PNFU. Por lo tanto han sido un buen campo de pruebas para realizar estudios comparativos entre el uso o no PNFU en la fabricación de mezclas bituminosas para rodadura.

Los tramos de prueba estudiados son de mezclas bituminosas en caliente tipo BBTM-11^a (F-10) de 700 metros de longitud en situación contigua, ubicados en la Autovía Lorca-Águilas RM -11 (antigua C-3321) entre los PK 25-22 sentido Lorca. (Fotografías 1 y 2)



Fotografías 1 y 2: Ensayos mecánicos realizados a los testigos

Siendo sus composiciones las siguientes:

TRAMO 1.- F-10 (BBTM 11A) por vía húmeda con betún BM-3b C (PMB 45/80-60 C).

TRAMO 2.- F-10 (BBTM 11A) por vía seca, con betún 50/70 y PNFU incorporado “in situ” (0,5% de la masa total) y catalizador necesario para la reacción de digestión betún-caucho.

TRAMO 3.- F-10 (BBTM 11A) con betún modificado PMB 45/80-65.

El estudio trató de hacer un comparativo de los tres tramos de prueba, dónde se comprobaron las posibles ventajas medioambientales y de seguridad al utilizar los PNFU,s, para ellos se

realizaron ensayos relacionados con las prestaciones mecánicas, características acústicas, colorimétricos y de resistencia al deslizamiento.

Las conclusiones a las que se llegaron en el estudio preliminar fueron:

- Posibilidad de utilización de un residuo como es el PNFU sin tener que penalizar las prestaciones de los firmes.
- Disminución de la contaminación acústica (ruido del tráfico).
- Mejora de la resistencia al deslizamiento.
- Mantenimiento de la tonalidad negra del firme más tiempo, mejorando el contraste de color con las marcas viales horizontales.

Pasados cinco años de este estudio y de la puesta en obra hemos realizado un seguimiento para comprobar la evolución de los tramos de prueba y verificar si las conclusiones obtenidas hace cinco años se mantienen.

ACTUACIONES Y ENSAYOS

Las actuaciones y ensayos realizados a los tramos de prueba han sido los siguientes:

- 1.- Ensayos mecánicos y prestacionales. Extracción de testigos (seis especímenes por cada tramo), para determinar las propiedades mecánicas de los mismos y proceder a la extracción de los ligantes para comprobar su grado de evolución; así como las densidades y compactaciones.
- 2.- Ensayos acústicos
- 3.- Estudio colorimétrico. Comprobación de la evolución de color.
- 4.- Ensayos de resistencia al deslizamiento

Ensayos mecánicos y prestacionales

Como podemos observar en los resultados de los ensayos mecánicos realizados sobre los testigos, los parámetros en los tres tramos son muy parecidos, en el % betún, densidad, huecos, granulometría, etc (Tabla 1). Asimismo los ensayos de tracción indirecta y módulo resiliente nos indica que la cohesión de las tres mezclas es parecida, por lo tanto el comportamiento mecánico y prestacional es favorable en los tramos con PNFU,s.

Tabla 1: Ensayos mecánicos realizados a los testigos

ENSAYO	UNIDAD	NORMA	TRAMO 1 BBTM11A pnfu-VÍA HÚMEDA	TRAMO 2 BBTM11A pnfu-VÍA SECA	TRAMO 3 BBTM11A PMB 45/80-65
% Ligante sobre/árido	%	UNE-EN 12697-39	5,47	5,64	5,66
Densidad volumétrica	Kgs/m³	UNE-EN 12697-6	2152	2288	2263
Densidad máxima	Kgs/m³	UNE-EN 12697-5	2380	2386	2400
Huecos mezcla	%	UNE-EN 12697-8	9,5	9,1	8,5
Resist. T. Indirecta (ITS)	MPa	UNE-EN 12697-12	1,91	2,13	2,02
Módulo resiliente	MPa	UNE-EN 12697-26	5090	6954	5109
Granulometría del árido extraído, % pasa, tamiz mm					
16			100	100	100
12,5			99	99	99
10			88	90	88
8			67	67	67
4			32	30	33
2			24	24	24
0,5			16	16	16
0,25			13	13	14
0,125			11	10	11
0,063			7,9	8	8
Relación f/b			1,4	1,4	1,5

Los ensayos mecánicos y prestacionales realizados cuando se ejecutaron los tramos de prueba (hace cinco años) también dieron resultados satisfactorios (Tabla 2)

Tabla 2: Ensayos mecánicos realizados a las mezclas bituminosas

ENSAYO	UNIDAD	NORMA	TRAMO 1 BBTM11A pnfu-VÍA HÚMEDA	TRAMO 2 BBTM11A pnfu-VÍA SECA	TRAMO 3 BBTM11A PMB 45/80-65
% ligante de árido	%	NLT-384	5,62	5,48	5,48
Relación f/b		NLT-165	1,42	1,48	1,39
Huecos mezcla	%	NLT-168	6,2	6,4	6,2
Estabilidad	KN	NLT-159	10,8	10,6	11,8
Deformación	mm	NLT-159	1,9	1,8	2,3
Inmersión-compresión	%	NLT-162	76,2	81,9	96,9
Ensayo cantabro seco	%	NLT-352	2,9	4,8	5,1
Ensayo cantabro húmedo	%	NLT-352	3,8	5,5	5,9
Resist. T. Indirecta (ITS)	MPa	UNE-EN 12697-23	2,3	3,1	2,6
Resist. a compresión diametral	MPa	NLT-346	2,8	3,2	3,0
Resist. T. ind. conservada (ITSR)	%	UNE-EN 12697-12	99,5	94,9	95,7
Módulo dinámico	MPa	NLT-349	4120	5860	5292
Angulo de desfase	°	NLT-349	19,5	16,4	17,7
Ensayo escurrimiento	%	UNE-EN 12697-18	0,02	0,03	0,13
Velocidad deformación - Ensayo de pista	μ/min 105-120	NLT-173	1,3	0,9	0,6
Deformación total- Ensayo de pista	mm	NLT-173	1,633	1,506	1,349

A los testigos obtenidos en cada tramo se les extrajo el ligante según norma UNE EN 12697 – 3. Estos ligantes se caracterizaron posteriormente, con el objetivo de determinar el grado de envejecimiento, mediante cromatografía en columna según ASTM 2006, (Tabla 3 y 4)

Tabla 3: Caracterización de los ligantes de los testigos

ENSAYO	UNIDAD	TRAMO 1 PMB 45/80-60C pnfu-VÍA HÚMEDA	TRAMO 2 B 50/70 pnfu-VÍA SECA	TRAMO 3 PMB 45/80-65
% Ligante sobre/árido	%	5,47	5,64	5,66
Penetración	10 ⁻¹ mm	11	12	14
Punto de reblandecimiento A&B	°C	84,2	84,2	71
Punto fragilidad Fraas	°C	- 4	- 7	- 7

Tabla 4: Caracterización de los ligantes de los testigos

ENSAYO	UNIDAD	TRAMO 1 PMB 45/80-60C pnfu-VÍA HÚMEDA	TRAMO 2 B 50/70 pnfu-VÍA SECA	TRAMO 3 PMB 45/80-65
Composición del ligante recuperado por cromatografía en columna				
% Asfaltenos (A)		37,7	34,8	35,2
% Polares (N)		20	21,4	22,3
% 1ª acidafinas (A1)		11,1	11,8	10,6
% 2ª acidafinas (A2)		22,5	25,1	24,6
% Saturados (P)		8,6	6,9	7,2
Índices estabilidad ligante recuperado				
Compatibilidad, C> 0,5		2,32	3,1	3,1
Inestabilidad coloidal, IC <1		0,86	0,72	0,74
Durabilidad, 0,4<CRR<1,5		1,00	1,04	1,03

Los tres ligantes recuperados muestran unos índices de estabilidad dentro de los límites establecidos, por lo que el grado de envejecimiento alcanzado en estos cinco años todavía no es susceptible de rejuvenecimiento.

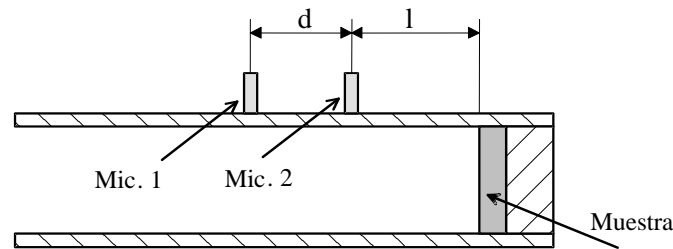
Ensayos acústicos

Los métodos ensayados pasados cinco años han sido iguales a los realizados al inicio de la puesta en obra de los tramos de prueba, ha sido los siguientes:

Medida del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia. Método de la función de transferencia.

A los testigos de los tramos de prueba se les ha realizado en el laboratorio, mediante el tubo de impedancia, la absorción acústica que cada mezcla bituminosa. El proceso de medida del coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia característica se describe en la norma ISO 10354-2. Consiste en la medición de la función de transferencia H_{12} , cociente de las presiones complejas en los canales 1 y 2. (Figura 1), comprobando la coherencia de la medición. El procedimiento de medida implica una calibración de la respuesta de los micrófonos. Para ello se mide H_{21} (función de transferencia con los micrófonos cruzados, en las posiciones 2 y 1) y se corrigen los defectos de fase.

Figura 1: Disposición de micrófonos y la muestra



A la vista de los resultados obtenidos se debe concluir que no hay diferencias significativas entre los tramos en lo que respecta al coeficiente de absorción promedio, debido a que el % de huecos es prácticamente igual en los tres tramos (tienen una granulometría y un contenido de betún muy parecidos). Los ensayos realizados al inicio dieron los mismos resultados.

Medida de la influencia de la superficie de la carretera sobre el ruido del tráfico. Método estadístico de paso (SPBI)

El método Estadístico de Paso (SPB, Statistical Pass-By) está diseñado para evaluar la influencia en el ruido de tráfico de superficies diferentes en lugares determinados (restricciones sobre el entorno acústico) con independencia de su condición y edad.

En este ensayo se obtiene niveles de presión sonora ponderada a una distancia normalizada procedente de 100 vehículos para cada uno de los tres tramos. La velocidad de paso de los vehículos queda registrada por un radar. De los valores de presión y velocidad se obtiene una recta de regresión de la cual se obtiene un valor de nivel de ruido SPBI para cada tramo. Este ensayo se lleva a cabo según la norma UNE-EN ISO 11819-1:1997.

Como podemos observar en este método, transcurridos cinco años, los tramos con PNFU's siguen teniendo una atenuación de ruido respecto al firme convencional de 0.7 a 2.9 dB(A); mejor en el tramo por vía seca. Esta característica también se apreció en los ensayos realizados al término de los tramos de prueba (Tabla 5)

Tabla 5: Resultados del método estadístico de paso- SPBI

MÉTODO ESTADÍSTICO DE PASO (SPBI)	dB(A)			
	inicio	5 años	ΔT_3 - Inicio	ΔT_3 - 5 año
TRAMO 1 .-BBTM 11A - pnfu-VÍA HÚMEDA	78,3	75,5	-2,4	-0,7
TRAMO 2.- BBTM 11A - pnfu-VÍA SECA	76,7	77,7	-4,0	-2,9
TRAMO 3.- BBTM 11A - PMB 45/80-65	80,7	78,4		

Medida del nivel de presión sonora [dB(A)]. Método de paso (pass-by).

Este ensayo ha sido realizado siguiendo las pautas marcadas por la Directiva EU 2001/43/CE, apéndice 1 en donde se expresa el Método de ensayo de niveles de ruido neumático/carretera-Método de punto muerto. En este ensayo se utiliza un solo coche lanzado a una velocidad determinada, y colocando el sonómetro a una distancia y altura marcada por norma; cuando pasa el coche en punto muerto a la altura del sonómetro se mide el nivel de presión sonora [dB(A)] generado por el contacto neumático/carretera. En cada tramo se hicieron tres mediciones con el sonómetro a velocidades constantes de 80 y 100 Km/h, sacando una media por tramo. Como podemos observar en la (Tabla 6), con este método, tanto a 80 Km/h como a 100 Km/h los tramos con PNFU's pasados cinco años siguen teniendo una atenuación de ruido respecto al firme convencional de 1.7 a 3.3 dB(A); mejor en el tramo por vía seca. Los resultados obtenidos al inicio de los tramos también se observaba esta característica.

Tabla 6: Resultados del método de paso – pass-by

MÉTODO DE PASO 80 Km/h	dB(A)			
	1 año	5 años	ΔT_3 - 1 año	ΔT_3 - 5 año
TRAMO 1 .-BBTM 11A - pnfu-VÍA HÚMEDA	74,5	75,4	-2,6	-1,7
TRAMO 2.- BBTM 11A - pnfu-VÍA SECA	75,1	74,3	-2,0	-2,8
TRAMO 3.- BBTM 11A - PMB 45/80-65	77,1	77,1		
MÉTODO DE PASO 100 Km/h	dB(A)			
	1 año	5 años	ΔT_3 - 1 año	ΔT_3 - 5 año
TRAMO 1 .-BBTM 11A - pnfu-VÍA HÚMEDA	77,2	77,8	-2,5	-2,1
TRAMO 2.- BBTM 11A - pnfu-VÍA SECA	77,3	76,6	-2,4	-3,3
TRAMO 3.- BBTM 11A - PMB 45/80-65	79,7	79,9		

Estudio colorimétrico.- Evolución del color

La tonalidad negra de los firmes de rodadura se asocia a una mayor seguridad vial debido al contraste con las marcas blancas horizontales.

El polvo de neumático fuera de uso (PNFU) tiene en su composición alrededor del 30% de negro de humo (carbono activo); este componente es un pigmento inorgánico que por su naturaleza química mantiene su capacidad cromática al paso del tiempo. Por lo tanto los firmes que contengan polvo de neumático mantendrán la tonalidad negra más tiempo. Las medidas de color se han realizado “in situ” con dos colorímetros diferenciales para poder calcular el coeficiente de reproducibilidad del procedimiento del ensayo. Uno de ellos se ha utilizado en todas las medidas realizadas a lo largo del tiempo transcurrido y es un colorímetro portátil modelo Miniscan de Hunterlab. Para realizar el ensayo paralelo se ha utilizado el colorímetro Datacolor.

Para poder cuantificar el color, hemos elegido el SISTEMA CIELAB 1976, donde mide las coordenadas colorimétricas L^* , a^* y b^* . La coordenada **colorimétrica L^*** se define como “luminosidad”, y oscila entre valor cero (0) negro absoluto y cien (100) blanco puro. Por lo tanto es la coordenada la que nos va a decir la evolución de la tonalidad negra de un firme. Cuanto más baja sea, más negra es la superficie. Los valores de la coordenada **cromática a^*** oscilan entre +60 y -60, y va desde rojo puro al verde. En el caso de la coordenada **cromática b^*** los valores también oscilan entre +60 y -60, yendo desde el amarillo al azul. Por lo tanto cada color lo podemos cuantificar con tres parámetros (L^* , a^* y b^*), y cuantificar las diferencias entre dos medidas (ΔL^* , Δa^* y Δb^*), y además definir las diferencias percepción que se tienen de dos medidas. Para cuantificar la diferencia de color entre dos mediciones el sistema CIELAB marca el parámetro ΔE , siendo su definición: $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$. Según la (Tabla 7) se puede relacionar los valores de ΔE entre dos medidas con la percepción humana.

Tabla 7: Relación entre diferencias de color- ΔE y percepción humana

Percepción humana de los cambios de color con base en los valores de ΔE
Human perception of the colour changes based on ΔE values

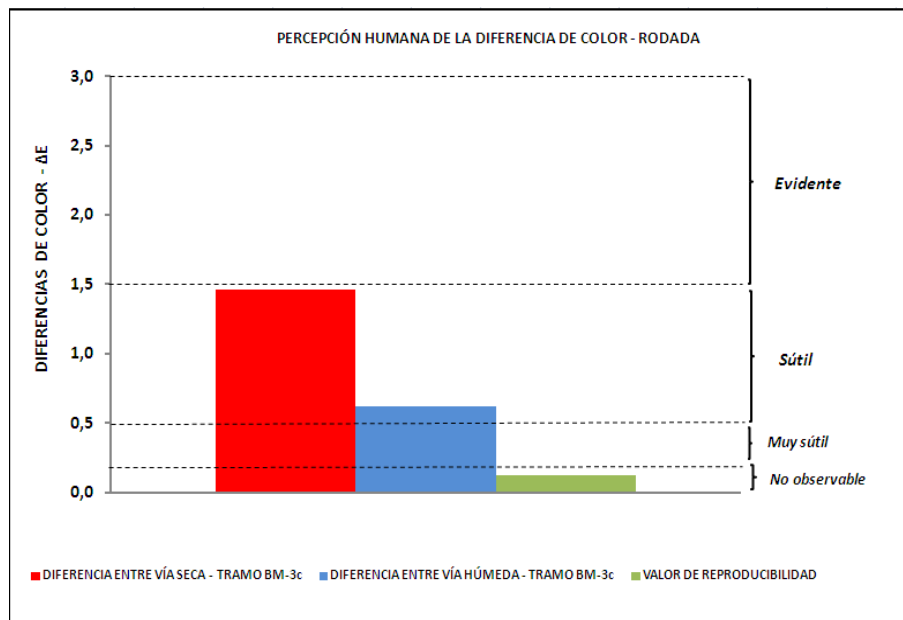
Cambio de Color (ΔE) / Colour Change (ΔE)	Percepción humana / Human perception
0.0 – 0.2	No observable / Not visible
0.2 – 0.5	Muy sutil / Very slight
0.5 – 1.5	Sutil / Slight
1.5 – 3.0	Evidente / Obvious
3.0 – 6.0	Muy evidente / Very obvious
6.0 -12.0	Grande / Large
> 12.0	Muy grande / Very large

Las mediciones de color se han realizado siguiendo la norma UNE 48073-94 y utilizando el iluminante D65, que representa el promedio de la luz diurna. En cada tramo se han realizado mediciones en seis puntos diferentes y en cada punto se han tomado cinco determinaciones, obteniéndose las respectivas medias aritméticas. Las mediciones se han realizado en la zona de rodada del tráfico. Las diferencias de color entre los tramos con PNFU y el tramo con betún BM-3c son las siguientes (Tabla 8 y Gráfica 1)

Tabla 8: Diferencias de color entre tramos

DIFERENCIAS DE COLOR ENTRE	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	PERCEPCIÓN HUMANA
VIA SECA - BM-3c	-1,06	-0,02	-1,00	1,46	SUTIL EVIDENTE
	+ negro - blanco	+ rojo - verde	+ azul - amarillo		
VIA HÚMEDA-BM-3c	-0,54	0,16	-0,27	0,62	SUTIL
	+ negro - blanco	+ verde - rojo	+ azul - amarillo		

Gráfica 1: Diferencias de color entre tramos



Como se aprecia los tramos con PNFU son más oscuros que el tramo que no lleva PNFU, siendo en el tramo por vía seca la percepción visual de la diferencia de color ($\Delta E = 1,46$) casi evidente. Para comprobar la representatividad del ensayo se han realizado medidas con dos colorímetros diferentes obteniéndose valor de $\Delta E = 0,12$ de diferencia entre ellos. Esta medida se ha realizado en condiciones de reproducibilidad según define la ASTM para un método de prueba estándar – STM.

Ensayos de resistencia al deslizamiento

En cada tramo se hicieron mediciones con el Péndulo TRRL en seis puntos diferentes de cada tramo, sacando una media por tramo

Cómo podemos observar (Tabla 8) después de cinco años en servicio, tenemos mejor CRD en los tramos con PNFU's que en el tramo convencional. Esta afirmación también se apreció al principio de la puesta en servicio de los tramos de prueba.

Tabla 8: Resultados del Coeficiente de resistencia al deslizamiento - CRD

COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO - CRD	PERIODO DE MEDICIÓN	
	1 año	5 años
TRAMO 1 .-BBTM 11A - pnfu-VÍA HÚMEDA	0,58	0,57
TRAMO 2.- BBTM 11A - pnfu-VÍA SECA	0,56	0,56
TRAMO 3.- BBTM 11A - PMB 45/80-65	0,52	0,55

CONCLUSIONES

Pasados cinco años desde la puesta en obra de los tramos de prueba con PNFU's podemos afirmar que:

- Los buenos resultados prestacionales y mecánicos obtenidos nos confirman que la utilización de PNFU's es una técnica con futuro.
- Los tres ligantes recuperados muestran unos índices de estabilidad dentro de los límites establecidos y todavía no son susceptibles de rejuvenecimiento.
- La absorción acústica es baja y muy parecida en todos los tramos, esto es debido a la granulométrica y al contenido de huecos (bajo).
- En las mediciones acústicas, tanto en Método SPBI cómo en el de Método de Paso, hay una reducción del ruido ambiental en los tramos con PNFU's respecto al firme convencional.
- En las mediciones de color, el mantenimiento de la tonalidad negra es mejor en los tramos con PNFU's respecto al firme convencional, siendo perceptible a la visión humana
- El CRD es mejor en los tramos con PNFU's con respecto al firme convencional.