

**ANÁLISIS DE LA MEDIDA
EN LABORATORIO DE
LA RESISTENCIA
AL DESLIZAMIENTO DE
MEZCLAS BITUMINOSAS CON
EL EQUIPO WEHNER SCHULZE.
COMPARACION CON EQUIPOS
DE ALTO RENDIMIENTO
EMPLEADOS EN CAMPO**

MARISOL BARRAL
CAMPEZO OBRAS Y SERVICIOS S.A.

JOSÉ ANTONIO NAVARRO
DIPUTACIÓN FORAL DE GIPUZKOA

AURELIO RUIZ
CIESM-INTEVIA

NURIA UGUET
EUROVIA MANAGEMENT ESPAÑA

ANÁLISIS DE LA MEDIDA EN LABORATORIO DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON EL EQUIPO WEHNER SCHULZE. COMPARACION CON EQUIPOS DE ALTO RENDIMIENTO EMPLEADOS EN CAMPO

RESUMEN

Cuando se extiende una capa de rodadura de cualquier tipo de mezcla bituminosa, una de las características superficiales que se le exige a ésta es la resistencia al deslizamiento, ya que se trata de una característica de importancia por su gran incidencia en la seguridad en la conducción.

Las prescripciones españolas en relación con la resistencia al deslizamiento de las capas de rodadura vienen definidas por la calidad del árido empleado en la fabricación de la mezcla, la resistencia a la fragmentación y al pulimento acelerado del árido grueso. Ambas características, conjuntamente con la composición de la mezcla, determinan la macrotextura superficial según la norma UNE-EN 13036-1 y la resistencia al deslizamiento (según la norma NLT-336) de las mezclas bituminosas, tras la puesta en obra de éstas. Sin embargo, en España no se cuenta con ensayos normalizados que permitan predecir la resistencia al deslizamiento en fase de diseño de estas mezclas, lo que permitiría definir con más propiedad sus características, o bien analizar la evolución de la resistencia al deslizamiento de las mezclas bituminosas una vez extendidas, si bien, ya existe la norma europea EN 12697-49 aprobada en enero del 2014, pendiente de su traducción para tener la norma Española UNE (que estará en un plazo de 6-9 meses).

En esta comunicación se presentan los resultados de un estudio realizado por la Diputación Foral de

Gipuzkoa con la colaboración de Campezo Obras y Servicios, Ciesm-Intevia y Probisa, dirigido a la comprobación de la validez del equipo Wehner Schulze para la predicción de la resistencia al deslizamiento. Para ello se consideraron varios tramos de carretera sobre los que se extrajeron testigos que se ensayaron mediante el citado equipo. Los resultados se contrastaron con las medidas de resistencia al deslizamiento realizadas durante dos años de servicio.

INTRODUCCIÓN

La resistencia al deslizamiento tiene una gran importancia para la seguridad de los usuarios de las carreteras y es uno de los criterios de aceptación y rechazo de la unidad terminada, establecido en los artículos 542 y 543 del PG-3 para la recepción de las obras. Por otra parte, la resistencia al deslizamiento se emplea también como indicador del estado del firme durante la explotación de la carretera para determinar el grado de seguridad que ofrece la rodadura y, en su caso, tomar medidas oportunas, siendo uno de los indicadores que se consideran en los contratos de conservación por niveles de servicio, actualmente vigentes.

La Diputación Foral de Gipuzkoa viene realizando estudios sobre la resistencia al deslizamiento de su red desde el año 2004. Los primeros resultados se presentaron en 2007 en el documento "Análisis del comportamiento de las mezclas bituminosas

frente a la resistencia al deslizamiento" en el que se recogían las auscultaciones de este parámetro, medidas con una frecuencia trimestral, entre septiembre de 2004 y junio de 2006, sobre un total de treinta y nueve tramos de un kilómetro de longitud, aproximadamente.

En los estudios de la Diputación Foral de Gipuzkoa se pusieron de manifiesto las dificultades que surgen para la aplicación de la especificación actual de este parámetro en el PG-3 debido a las grandes variaciones estacionales que presenta en función de la época del año en la que se realiza la auscultación, así como por las oscilaciones año a año, es decir, al carácter estacional y flotante de esta característica. Se vio por tanto que hay que modificar la manera en que se incluye en las especificaciones para poder tomar adecuadamente las decisiones sobre las actuaciones a adoptar respecto a una capa de rodadura. Las modificaciones deben consistir en la definición de un procedimiento que elimine las posibles variaciones estacionales y anuales.

Como continuación del estudio realizado entre 2004 y 2006, la Diputación Foral de Gipuzkoa a través de su Departamento de Movilidad e Infraestructuras Viarias, tiene abierto en la actualidad un proyecto de investigación basado en la auscultación con una frecuencia trimestral, entre noviembre de 2011 y agosto de 2013, sobre un total de dieciséis tramos de un kilómetro de longitud, aproximadamente, empleando el mismo equipo tipo Griptester que se había empleado en el estudio anterior. El primer objetivo es establecer las relaciones entre las características superficiales de las mezclas y las propiedades de los áridos para, en última instancia, proponer los criterios y especificaciones que permitan analizar el diferente comportamiento frente a la resistencia al deslizamiento de distintos tipos de mezclas bituminosas empleadas en capa de rodadura. De aquí se debe poder definir finalmente unos valores mínimos a exigir para la resistencia al deslizamiento y un procedimiento que tenga en cuenta las variaciones estacionales.

Por otro lado, en el estudio de 2004 a 2006 se observó que el coeficiente de pulido acelerado de los áridos gruesos (PSV) no clasifica siempre a los

áridos según el comportamiento que se mide en carretera, es decir, que un árido con un coeficiente de pulido acelerado, PSV, mayor que otro puede comportarse luego peor en servicio. Además, resulta conocida la existencia de otros factores de diseño de las mezclas bituminosas, además del PSV del árido grueso y de la composición de la mezcla bituminosa, que pueden influir sobre la resistencia al deslizamiento de la capa de rodadura como son el tamaño máximo del árido, el contenido y tipo de arena o árido fino, el polvo mineral y el tipo y contenido de ligante. Al no poderse caracterizar en laboratorio la influencia de los factores que intervienen en el proceso el contratista no puede asegurar que aun cumpliendo las exigencias respecto a los áridos, diseñando una composición de la mezcla adecuada, y posteriormente cumpliendo la medida de la macrotextura se alcance finalmente la resistencia al deslizamiento exigida.

En consecuencia, sería de gran interés disponer de herramientas que permitan optimizar en laboratorio la dosificación de la mezcla bituminosa y que además puedan predecir la evolución del coeficiente de rozamiento durante la explotación para poder actuar a priori, antes de la puesta en obra y no con medidas correctoras posteriores a la entrada en servicio como se hace actualmente.

A raíz de la aparición de la norma en proyecto EN 12697-49 en la que se describe una metodología para la determinación de la resistencia al deslizamiento de una mezcla bituminosa a nivel de laboratorio utilizando el equipo Wehner Schulze y tras la visita que se realizó al laboratorio de investigación de Eurovia (Burdeos) para conocer el susodicho equipo, surgió la posibilidad de abrir una nueva línea de estudio sobre la resistencia al deslizamiento en colaboración con Campezo Obras y Servicios, Ciesm-Intevia y Probisa, comparando la información obtenida a partir de la máquina de ensayo de laboratorio y los resultados de las auscultaciones realizadas en campo por la empresa Ciesm-Intevia, contratada por Diputación Foral de Gipuzkoa para dicho trabajo.

Esta comunicación presenta los resultados obtenidos del estudio comparativo realizado entre las

mediciones obtenidas a nivel de laboratorio con el equipo Wehner Schulze y las mediciones de campo con equipos de alto rendimiento.

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El planteamiento del estudio consiste en tomar testigos de los tramos a los que se ha hecho un seguimiento continuo para proceder a su ensayo mediante el equipo Wehner Schulze y comparar los resultados con los valores medidos mediante el equipo Griptester, para determinar la validez del Wehner Schulze para la predicción de la resistencia al deslizamiento bajo condiciones de servicio. Si se observase una relación razonable entre ambos resultados se contaría con una herramienta poderosa para la estimación de la validez de áridos y fórmulas de trabajo de las mezclas bituminosas y de optimizar los diseños teniendo en cuenta la resistencia al deslizamiento.

Para ello se seleccionaron cinco tramos de los dieciséis utilizados en la investigación emprendida en 2011. Estos tramos tenían mezclas bituminosas discontinuas BBTM tipo A y B, que son las utilizadas normalmente como capas de rodadura en las carreteras del País Vasco. El conjunto de las mezclas tenía áridos gruesos de tres orígenes diferentes. Los tramos soportaban categorías de tráfico pesado tipo T 2 a T 00.

Una vez determinadas las curvas de evolución del coeficiente de rozamiento transversal (CRT) con el equipo Griptester como parámetro de la resistencia al deslizamiento, obtenidas a partir de las auscultaciones trimestrales en carretera, se realizó una campaña de extracción de testigos en los arcones de los tramos, con el fin de determinar la resistencia al deslizamiento a nivel de laboratorio empleando el equipo Wehner Schulze.

Posteriormente, se han caracterizado las mezclas estudiadas (granulometría, contenido de ligante, etc...), así como los propios áridos utilizados (resistencia a la fragmentación y al desgaste, pulimento, etc...) con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos con las características precisas de las mezclas.

Por último, se ha realizado un análisis de comparación y contraste entre las mediciones de la resistencia al deslizamiento y los resultados obtenidos en laboratorio con el equipo Wehner Schulze.

LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO Y SU MEDIDA EN EL LABORATORIO

En la resistencia al deslizamiento intervienen varios mecanismos.

Textura de la superficie

La textura de la carretera afecta a la interacción neumático-pavimento y especialmente a la deformación del neumático y a la unión molecular de las superficies. Conviene aquí distinguir los tipos de rugosidades que presenta un pavimento y así hablar de megatextura, macrotextura y microtextura. Las dos últimas son las que están relacionadas con el pulimento de la capa superficial. Para distinguir cada una de ellas se hace de acuerdo a las longitudes de onda y amplitudes que se resumen en la siguiente tabla 1 (1):

Tabla 1: Clasificación de la textura de la superficie en pavimentos.

Clase de textura	Longitud de onda (mm)	Amplitud (mm)
Macrotextura	0.5-50	0.1-20
Microtextura	<0.5	0.001-0.5

La macrotextura la proporciona la disposición y proporción de los áridos y de los huecos. Los factores que aumentan la macrotextura son el tamaño máximo del árido y contenido de huecos. Y es la responsable del drenaje del agua entre la interfaz neumático-carretera.

La microtextura depende en gran medida de la superficie de los áridos, esta característica no es visible a simple vista. En general, los áridos presentan inicialmente una buena microtextura pero debido al pulimento producido especialmente por el paso de vehículos pesados, esa característica suele ir empeorando. La aspereza de los áridos se requiere principalmente para que en condiciones de humedad,

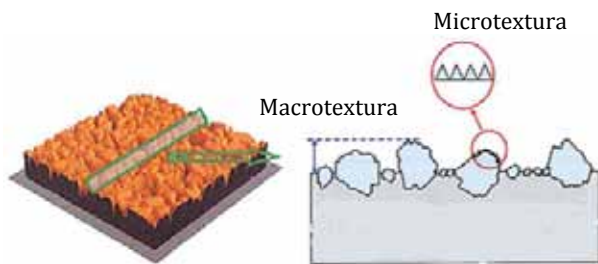


Figura 1: Imágenes de la microtextura y macrotextura de la superficie de un firme.

ésta pueda romper la fina capa de agua (<0.1 de profundidad) atrapada entre el neumático y la carretera, mejorando así el área efectiva de contacto.

Fenómenos físicos

La variación de la resistencia al deslizamiento se debe al menos a cuatro fenómenos, que a continuación se enumeran y se comentan muy brevemente. Generalmente, los efectos citados no se dan de forma individual si no que se pueden dar más de uno al mismo tiempo.

1. Desgaste mecánico debido principalmente al pulido por la acción del tráfico.

El pulido mecánico se debe principalmente a la fricción entre el neumático y la superficie de la carretera, la cual se acentúa por la presencia de polvo (2). Los autores Tourenq y Fourmaintraux, muestran que dependiendo del tamaño de la partícula del polvo, pueden suceder dos mecanismos: el pulido "general" que tiende a redondear el árido y el pulido "diferencial" que tiende a crear un re-perfilado de las caras de los áridos. La existencia del re-perfilado sólo es posible en las piedras poliminerales donde los minerales blandos, en los que la acción de pulido es significativo, definen valles y los minerales duros, que se ven afectados en menor medida que los minerales blandos, definen los picos. El pulido es mayor cuanto más tráfico pesado circule por la carretera.

2. Decapado del ligante

Tras la construcción o rehabilitación de una carretera, la mezcla bituminosa extendida presenta una capa de betón (que su grosor dependerá del

tipo de mezcla, contenido y tipo de ligante en la mezcla), por lo que la microtextura de los áridos está enmascarada y la resistencia al deslizamiento en este primer momento no es muy elevada. El paso del tráfico elimina de forma progresiva el ligante superficial y comienza a incrementar la fricción neumático-pavimento. Generalmente, se asume que el ligante se ha eliminado de la superficie cuando se alcanza el máximo del coeficiente de rozamiento en las curvas de evolución. En este momento es cuando la microtextura debida al árido está expuesta al mecanismo de desgaste.

El tiempo que se tarda en eliminar el ligante de la capa de rodadura depende del tráfico, de las condiciones medioambientales y de las propiedades del ligante y de la mezcla, por ello no existe una regla única y se puede decir que suele variar entre seis meses a dos años después de la apertura al tráfico de la carretera (3,4).

3. Variaciones estacionales

El efecto de las variaciones estacionales se puede ver a través de mediciones realizadas en distintos días, donde los valores más bajos de la resistencia al deslizamiento se logran al final del verano o en épocas secas y el más elevado durante el invierno o en épocas húmedas (5, 6). La variación es aproximadamente de tipo sinusoidal. Existen muchas explicaciones a este hecho pero ninguna está soportada por resultados objetivos. La hipótesis más ampliamente extendida es que en verano las partículas de polvo se encuentran atrapadas entre el neumático y el pavimento y esto actúa como abrasivo y durante el invierno, las precipitaciones limpian la superficie de la carretera de las partículas finas y depositan partículas más gruesas que ayudan a restaurar la textura (6,7).

4. Efecto del envejecimiento

El envejecimiento se debe a las condiciones climáticas (variaciones de temperatura, acción del oxígeno del aire, de la lluvia ácida) y puede mejorar la resistencia al deslizamiento. Se han observado incrementos del coeficiente de fricción en carreteras francesas de baja intensidad de tráfico (8).

Por otro lado, la resistencia al deslizamiento de una mezcla bituminosa tiene una fase inicial desde la puesta en servicio hasta la pérdida de la película de betún que cubre los áridos de la superficie. Tras esta, hay otra fase de disminución brusca, y otra siguiente de estabilización, con variaciones estacionales, que decrece asintóticamente en función del tipo de mezcla, características del tráfico, condiciones ambientales, etc...

En las especificaciones españolas, la resistencia al deslizamiento de las capas de rodadura se controla en fase de diseño mediante la determinación en laboratorio de la resistencia a la fragmentación y al pulimento acelerado del árido grueso, determinados a través de los respectivos coeficientes LA y PSV, respectivamente. Se actúa sobre estos parámetros seleccionando un árido que cumpla ambos requerimientos, aunque recientemente los Pliegos de Prescripciones han elevado las exigencias sobre estas características, de manera que, a veces, resulta difícil encontrar canteras próximas a las obras que puedan producir áridos de esa calidad para los tráficos más pesados.

Otro parámetro que se tiene en cuenta para controlar la resistencia al deslizamiento es la macrotextura superficial de la capa de rodadura, medida en la carretera mediante el ensayo del círculo de arena tras la terminación de la capa. Se considera que cuanto mayor sea la macrotextura hay más facilidad en la capa de rodadura para ofrecer una vía de salida al agua depositada en la superficie, ya que las condiciones críticas de resistencia al deslizamiento se dan en presencia de agua. Se puede actuar sobre la textura en fase de diseño mediante la composición de la mezcla y posteriormente en la puesta en obra mediante los procedimientos de compactación y terminación.

El primer método de simulación de la acción del pulido en laboratorio fue desarrollado en los años 50 por el TRL (Transport Research Laboratory). Como consecuencia se redactó una Norma British Standard en 1960. Este método está incluido actualmente en la norma UNE-EN 1097-8 y tiene versiones en otras muchas normativas, como por ejemplo la ASTM D3319 de 1999. El método es

únicamente válido para partículas de árido grueso, sin que se pueda tener en cuenta la composición de la mezcla bituminosa, ya que la forma curva de las muestras y su tamaño lo hacen inviables para ensayar probetas de mezclas. Para resolver esta salvedad se han realizado estudios de correlación con valores de campo de la resistencia al deslizamiento y se han desarrollado modelos que relacionan el valor de PSV con las medidas de CRT en carretera haciendo intervenir el tráfico y otros factores.

El ensayo y los modelos desarrollados han mostrado varios inconvenientes. El ensayo da un valor de resistencia al deslizamiento después de pulido que se ha comprobado que no es el valor más bajo que se alcanza luego en carretera. Además, no siempre clasifica los áridos según su comportamiento en servicio. Se ha visto también que el cambio de régimen de los abrasivos puede hacer variar los resultados relativos entre distintos áridos. Los modelos de predicción también se han mostrado erráticos.

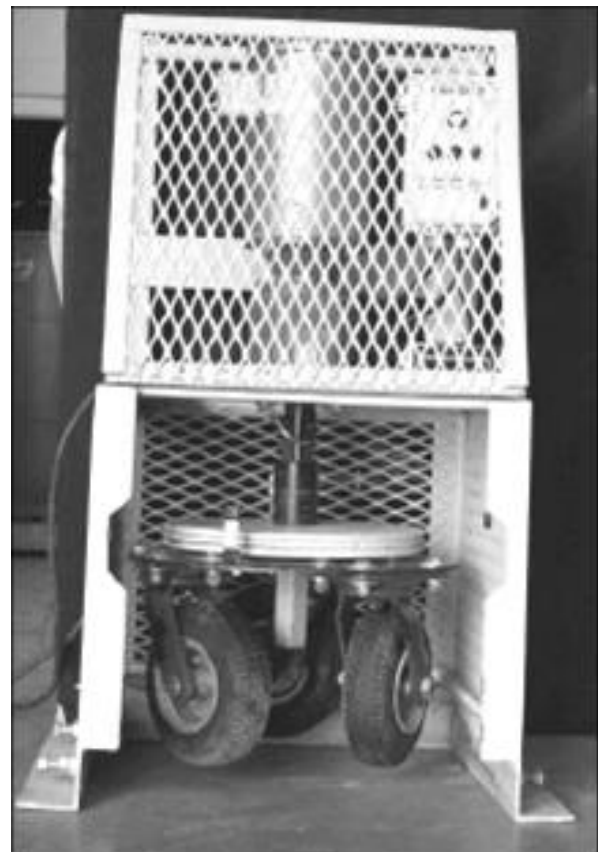


Figura 2: Equipo NCAT.

Estas circunstancias han hecho que se ponga en duda su validez para la estimación de la resistencia al deslizamiento de las mezclas bituminosas. Ha habido intentos de modificar el ensayo mediante cambios en el tiempo de pulido, incremento de la presión de la rueda durante el pulimento o desviación de la rueda con respecto al movimiento durante el pulido, sin que se haya llegado a conclusiones definitivas.

Por esta razón se están contemplando otros equipos para pulir superficies de mezclas bituminosas. Hay varios equipos alternativos pero los más extendidos son dos. Uno desarrollado por el National Center for Asphalt Technology (NCAT), que provoca el pulido de planchas de mezcla bituminosa mediante tres ruedas cargadas, y otro, desarrollado por los profesores Wehner y Schulze en la Universidad Técnica de Berlín en los años 70, en el que se utilizan unos rodillos de goma para esa función.

Este último equipo, recientemente mejorado y utilizado en varios países europeos, está mostrando resultados muy prometedores. Incluso las evaluaciones realizadas por el TRL, donde se originó el ensayo del PSV, señalan su prometedor potencial para la estimación de la resistencia al deslizamiento.

DATOS DE LOS TRAMOS DE CARRETERA ANALIZADOS

A continuación en la tabla 2 se resumen los tramos en donde se ha centrado todo el estudio, y donde se han realizado la toma de muestras y las medidas de campo. Por cada tramo se extrajeron un total de 3 testigos, en los puntos kilométricos indicados, dos testigos para el estudio del coeficiente de rozamiento a nivel de laboratorio y otro testigo para el análisis de las características de las mezclas.

Granulometrías de las mezclas bituminosas estudiadas

En las tablas 3 y 4 y figuras 3 y 4 se presentan las curvas granulométricas de las mezclas estudiadas en su correspondiente huso granulométrico.

Las granulometrías de las mezclas analizadas encajan en general en los husos respectivos. Como características más destacables está el elevado contenido de árido grueso en la mezcla tipo A con árido siderúrgico y el elevado contenido de betún (teniendo en cuenta su peso específico) de la misma mezcla. Por otro lado, tanto las mezclas BBTM A como la B con ofita del tipo diabasa tienen contenidos de finos elevados.

Tabla 2: Datos de Identificación de cada tramo estudiado.

Carretera	Puntos kilométricos de la toma de muestra	Tipo de mezcla	Antigüedad	Tipo de árido	Categoría de tráfico
A-15 Construcción de la variante de la carretera GI-131 en Urnieta.	p.k. 161,000 y 162,000	Tipo B	Diciembre de 2009	Ofita (Basalto)	T1 (IMD ₂₀₁₁ = 22.283).
N-I Rehabilitación estructural del firme de la N-I entre los p.k. 438,610 – 442,300 y 444,020 – 445,340 en sentido Vitoria – Irun.	p.k. 439,600 y 440,600	Tipo B	Octubre de 2010	Ofita (Diabasa)	T00 (IMD ₂₀₁₁ = 46.931).
N-I Rehabilitación estructural del firme de la N-I entre los p.k. 429,130 – 435,050	p.k. 431,000 y 430,000	Tipo A	Noviembre de 2011	Ofita (Diabasa)	T00 (IMD ₂₀₁₁ = 37.551).
GI-627 Rehabilitación estructural del firme de la GI-627 entre los p.k. 30,000 – 36,900	p.k. 33,000 y 34,000	Tipo A	Abril de 2010	Ofita (Basalto)	T2A (IMD ₂₀₁₁ = 9.225).
GI-627 Rehabilitación estructural del firme de la GI-627 entre los p.k. 42,360 – 46,100.	p.k. 43,000 y 44,000	Tipo A	Julio de 2009	Siderúrgico de horno eléctrico	T2A (IMD ₂₀₁₁ = 13.568).

Tabla 3: Granulométricas y contenido de ligante de las Mezcla BBTM 11A con los diferentes tipos de áridos.

Tamaño partículas (mm)	% Pasa				
	Huso BBTM 11A		Tipo A Ofita (Diabasa)	Tipo A Ofita (Basalto)	Tipo A siderúrgico
16	100	100	100	100	100
11,2	100	90	99	94	99
8	82	62	80	71	74
4	38	28	35	38	26
2	35	25	28	28	24
0,5	22	12	17	15	18
0,063	9	7	9,1	7,5	7,2
% betún s/m	-	-	4.89	5.10	4.80

Tabla 4: Granulométricas de las Mezcla BBTM 11B con los diferentes tipos de áridos.

Tamaño de las partículas (mm)	% Pasa			
	Huso BBTM 11B		Tipo B Ofita (Basalto)	Tipo B Ofita (Diabasa)
16	100	100	100	100
11,2	100	90	95	98
8	80	60	68	74
4	27	17	31	32
2	25	15	23	26
0,5	16	8	13	16
0,063	6	4	6,5	8,2
%betún s/m	-	-	4.79	5.03

Todas las mezclas bituminosas presentan el mismo tamaño máximo de árido de 16 mm. La diferencia que existen entre ellas se deben al tipo de mezcla BBTM B o BBTM A y la naturaleza de los áridos.

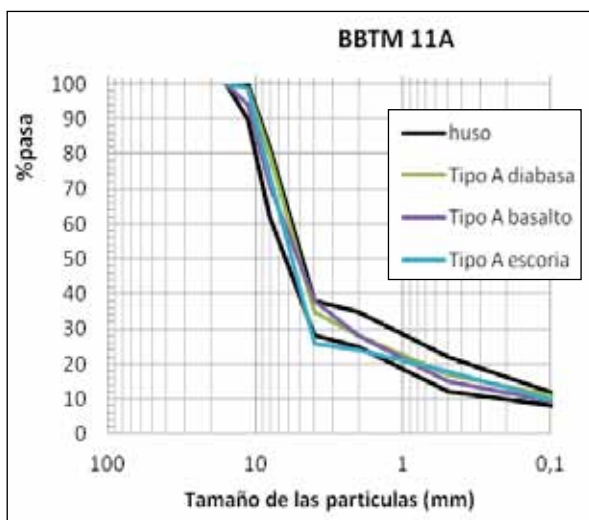


Figura 3: Curvas granulométricas de las mezclas bituminosas tipo BBTM 11A.

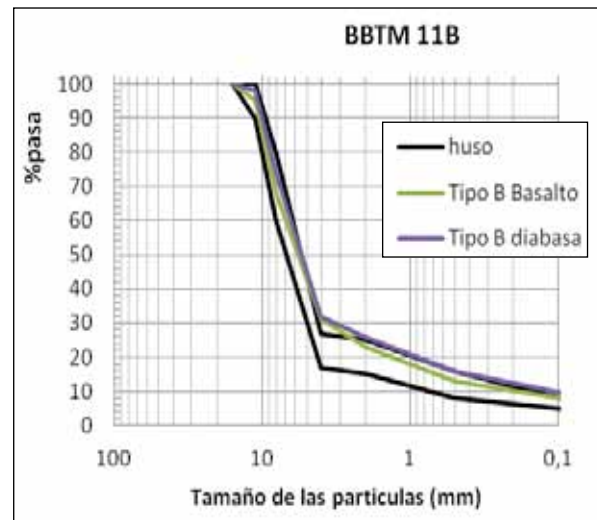


Figura 4: Curvas granulométricas de las mezclas bituminosas tipo BBTM 11B.

Características físicas de los áridos

Las características físicas de los tres tipos de áridos que componen las mezclas bituminosas estudiadas, se presentan en la tabla 5.

Tabla 5: Características físicas de los distintos áridos.

Tipo de árido	Tamaño máx. (mm)	Densidad (Mg/m ³)	PSV	LA	M _{DE}
Ofita (Basalto)	16	2.76	53	15	25
Ofita (Diabasa)	16	2.93	52	11	14
Siderúrgico	16	3.30	54	16	7

Se hace una distinción entre dos tipos de ofitas, ya que el término 'ofita' corresponde a una denominación local de roca que se relaciona fundamentalmente con la textura y color, y no está reconocido en la normativa europea. Las ofitas son generalmente diabasas, que se definen como rocas ígneas subvolcánicas de tipo dolerítico, formada por piroxenos, plagioclasas calco-sódicas y en ocasiones cuarzo. Pero también se conocen como ofitas a algunos basaltos que son rocas ígneas extrusivas que se forman a partir de lavas y piroclastos en la superficie de la tierra, de color muy oscuro, y que puede presentar cristales de piroxeno y olivino. Los basaltos, de origen más superficial, tienen características mecánicas distintas a las diabasas y presentan mayores alteraciones.

El denominado árido siderúrgico es una escoria negra de acería de horno eléctrico tratada como árido para carreteras.

Se observa que los áridos de mayor densidad son los áridos siderúrgicos, seguidas de las diabasas y por último los basaltos. El PSV es similar en todos los áridos analizados, y está comprendido entre 52 y 54. El ensayo Microdeval indica que las ofitas de tipo basalto presentan algún tipo de alteración.

Contenido de finos calizos

Se ha analizado el contenido de carbonatos de la fracción fina 0.063/2 mm según la norma UNE 103200 de cada una de las mezclas para determinar el tipo de finos utilizado, calizos u ofíticos, por si pudiesen tener influencia en la resistencia al deslizamiento, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Contenido de carbonato cálcico en la fracción fina 0.063/2 mm.

Tipo de mezcla	Contenido de carbonatos
Tipo B Ofita (Basalto)	38.8
Tipo B Ofita (Diabasa)	54.5
Tipo A Ofita (Diabasa)	63.8
Tipo A Ofita (Basalto)	53.3
Tipo A siderúrgico	59.1

Se observa que todas las mezclas salvo una tienen más del 50 % de finos calizos y únicamente en una de ellas (Tipo B Ofita – Basalto) predominan los ofíticos. En el caso del árido siderúrgico la proporción en peso del 59,1% de carbonatos significa que, teniendo en cuenta el peso específico de cada árido, había un volumen de finos calizos muy elevado.

MEDICIONES DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO A NIVEL DE LABORATORIO

Descripción de la máquina Wehner Schulze (EN 12697-49)

La máquina Wehner Schulze (WS) es el único equipo de ensayo normalizado a día de hoy en Europa que permite el pulimento acelerado de una mezcla bituminosa en el laboratorio. Además, se trata de un equipo muy versátil ya que se puede ensayar tanto mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio como testigos e incluso áridos. Por tanto, permite estudiar y evaluar el comportamiento frente al pulimento de diferentes mezclas bituminosas (o áridos) antes de su puesta en obra y, predecir la evolución de la adherencia con el tiempo teniendo en cuenta las características de los materiales constituyentes.



Figura 5: Máquina de la Wehner Schulze.

En España todavía no existe ningún equipo de este tipo, por ello el estudio que aquí se presenta se ha realizado en el centro de investigación que Eurovia-Probisa tiene en Burdeos, Francia (CRM). Una foto de la máquina WS se muestra en la página anterior, figura 5.

La máquina permite realizar el pulimento y la medida del coeficiente de fricción con el mismo dispositivo. Consta de dos cabezales, uno con el que se realiza el pulimento y otro con el que se realiza la medida del coeficiente de rozamiento.

El pulido se realiza mediante tres conos de caucho revestidos de una capa de goma estriada acoplados a una cabeza que hace movimientos planetarios sobre la superficie de la probeta. La acción de pulimento es reforzada por la aportación de manera continua de una mezcla de abrasivo y agua. El abrasivo es filler de cuarzo.

Las características del sistema de pulido son las siguientes:

- Frecuencia rotacional: 500 r.p.m. equivale a una velocidad lineal de 17 km/h.
- Presión de contacto entre los conos y la superficie de la muestra de aproximadamente 0,4 N/mm² (para coches ligeros, la presión del neumático es aproximadamente 0.2 N/mm²).
- Tasa de deslizamiento entre el 0.5% y 1%. (similar entre el neumático y la carretera).

La medición del coeficiente de rozamiento se realiza mediante un dispositivo compuesto por un disco sobre el que se acoplan 3 pequeños patines o zapatas en ángulos de 120° (área 4 cm², ver figura 5).

Para determinar el coeficiente de rozamiento, el disco se posiciona a unos pocos milímetros de la superficie de la probeta y se pone en rotación a una velocidad circular de aproximadamente 100 Km/h. Cuando alcanza esta velocidad, se proyecta agua sobre la probeta para evitar su calentamiento por fricción, y, es entonces cuando el cabezal se apoya sobre la misma, con una presión de contacto entre la goma y la muestra de 0.2 N/m², se para el motor y se deja que, el rozamiento entre los patines de goma y la probeta, produzca una deceleración hasta la parada total del disco. Se registra la curva de frenado (coeficiente de fricción frente a la velocidad) y el valor del coeficiente de rozamiento a 60 km/h, que se denomina coeficiente de Wehner Shulze, μ_{ws} .

Las muestras que se ensayaron fueron, como se ha indicado anteriormente, testigos de diferentes tipos de mezclas bituminosas extraídas de la carretera. Se extrajeron dos testigos de 250 mm de diámetro por cada tipo de mezcla y tramo y se cortaron posteriormente en el laboratorio a un espesor de 4 cm.

La superficie pulida es un anillo de aproximadamente 16 cm de diámetro y 6 cm de ancho (figura 6).

La máquina se puede programar para que pare después de una serie de rotaciones. En cada parada, se



Figura 6: Muestra de un testigo antes de su pulido (izq.) y después de su pulido (dcha.).

proyecta agua sobre la superficie de la muestra a 500 r.p.m. con el objeto de lavar la superficie. Después del pulido y lavado se traslada manualmente a la zona donde está el cabezal de medida de la fricción o coeficiente de rozamiento.

A continuación se describe el protocolo seguido en este trabajo para la determinación de las curvas de evolución del coeficiente de fricción:

- Para representar bien el inicio de la curva, entre 0 y 20.000 ciclos, se realizan medidas de coeficiente de rozamiento a los siguientes ciclos de pulido: 0, 2.000, 4.000, 6.000, 8.000, 10.000 y 15.000.
- A continuación se realizan medidas de coeficiente de rozamiento en intervalos mayores: 20.000, 50.000, 90.000 y 180.000.

En la figura 7 se presentan las curvas promedio de evolución del coeficiente de fricción de Wehner Shulze, μ_{WS} , en función del número de ciclos utilizados para el pulimento de la probeta.

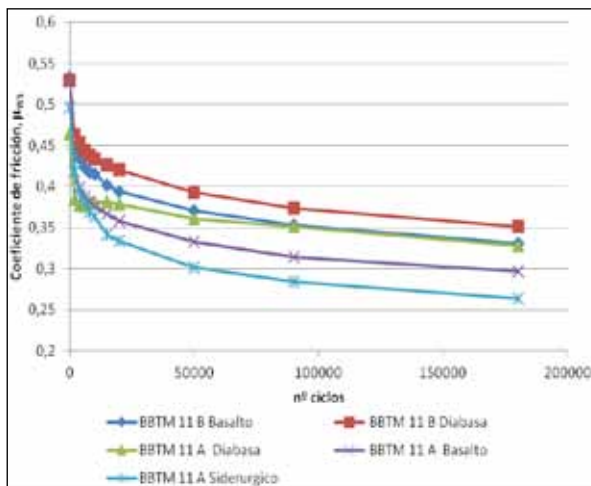


Figura 7: Curvas promedio de evolución del coeficiente de rozamiento a nivel de laboratorio.

Las curvas de la figura 7 definen la evolución del coeficiente de rozamiento de cada mezcla bituminosa estudiada y el coeficiente de fricción medido para los distintos ciclos de pulido. Las curvas representan los resultados medios de dos probetas. Las dispersiones estuvieron comprendidas entre 0,04 y 0,06 puntos, excepto en el caso de las escorias para el que fueron prácticamente coincidentes.

Con el objetivo de poder estimar el resultado de la resistencia al deslizamiento en medidas en carretera es necesario convertir los ciclos de pulido con la WS a número de vehículos pesados. Para ello Tang (9) propone la siguiente relación (ver ecuación 1) entre la duración del pulimento o lo que es lo mismo el número de ciclos (N) en la máquina WS y el número acumulado de vehículos pesados (T).

$$N = 0,024 \times T \quad (ec. 1)$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación 1 se puede determinar el tráfico requerido para causar el mismo pulimento que con la máquina WS dividiendo el número de ciclos por 0,024. Así, por ejemplo 180.000 ciclos representan 7,5 millones de vehículos pesados.

El siguiente paso sería convertir la evolución de la resistencia al deslizamiento con el tráfico basado en la máquina WS en resistencia al deslizamiento medida con equipos de campo como por ejemplo el SCRIM. Huschek (10) propone la siguiente relación entre los valores CRT determinados a la velocidad de 80 km/h usando el SCRIM Alemán y el coeficiente de fricción (μ_{WS}) obtenido con la WS.

$$CRT(80 \text{ km/h}) = (0,96 \mu_{WS} + 0,06) \times 100 \quad (ec. 2)$$

Tabla 7: CRT estimado en función de los vehículos pesados acumulados.

TRAMO	VEHÍCULOS PESADOS EQUIVALENTES ACUMULADOS (X10 ⁶)										
	0	0,08	0,16	0,30	0,33	0,40	0,60	0,80	2,00	4,00	8,00
A-15 Basalto	63,8	55,4	54,2	53,2	52,6	52,4	51,1	50,4	48,2	46,4	44,3
N-I Diabasa	63,3	57,0	56,1	55,2	54,6	54,2	53,5	52,9	50,3	48,4	46,2
N-I Diabasa	57,1	49,4	48,8	48,7	49,2	49,1	49,2	48,9	47,1	46,2	44,0
GI 627 Basalto	63,2	52,7	50,8	49,8	49,1	48,6	47,8	47,0	44,5	42,7	41,0
GI 627 Siderurgico	60,2	52,7	50,1	49,1	48,0	47,4	45,3	44,6	41,5	39,9	37,9

Finalmente, se puede obtener el CRT a 50 km/h mediante la expresión contenida en la Norma de UK HD28/04:

$$CRT(50 \text{ km/h})/100 = CRT(80 \text{ km/h}) + (80 \times 2,18 \times 10^{-3} - 0,109) \quad (\text{ec.3})$$

Las transformaciones correspondientes dan lugar a los resultados mostrados en la tabla 7 de la página anterior.

MEDIDA DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO EN CARRETERA

Para determinar la resistencia al deslizamiento en campo de un firme existe una gran variedad de equipos de medida basados todos ellos en diferentes principios de funcionamiento. En España, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento exige en su Pliego de Prescripciones Técnicas para carreteras (PG-3) que la resistencia al deslizamiento se mida mediante un equipo de rozamiento transversal tipo SCRIM, pero existen otras alternativas también normalizadas, entre las cuales destaca el equipo denominado Griptester. Este equipo también de alto rendimiento está normalizado mediante norma UNE-EN 15901-7 y es de utilización generalizada tanto en Europa como en EEUU. Hay estudios de correlación con el SCRIM de fiabilidad contrastada, lo que permiten trasladar directamente los resultados y esto ha permitido que un cierto número de empresas se hayan dotado de él y a su vez distintas administraciones, diferentes a la estatal como es el

caso de la Diputación Foral de Gipuzkoa, lo empleen en la auscultación de sus carreteras.

A continuación se representan en las figuras 8 y 9 las curvas de evolución del valor medio de la resistencia al deslizamiento para los 5 tipos de mezclas analizadas y para todas las campañas realizadas entre el mes de noviembre de 2011 y agosto de 2013.

Puede verse que para cada uno de los tramos hay fuertes variaciones estacionales. Así, por ejemplo, tomando los resultados del año 2012 y representando los valores máximos y mínimos de ese año, se tiene:

Tabla 8: Variaciones estacionales del CRT para el año 2012.

TRAMO	CRT MÁX.	CRT MIN.	VARIACIÓN
BBTM B			
A-15 Basalto	82	63	19
N-I Diabasa	73	59	14
BBTM A			
N-I Diabasa	71	61	10
GI 627 Basalto	75	59	16
GI 627 Siderúrgico	75	58	17

Los valores más elevados de este año 2012 se produjeron siempre en noviembre y los más reducidos en agosto.

En estas condiciones no es posible definir claramente un valor de resistencia al deslizamiento que se pueda comparar con el equipo del labo-

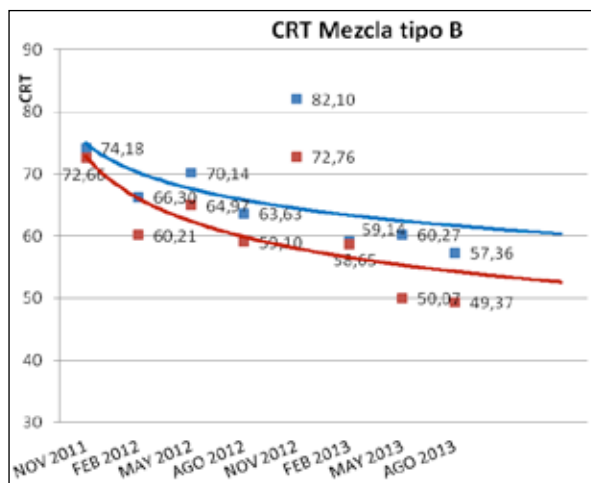


Figura 8: Curvas de evolución del coeficiente de rozamiento a nivel de campo para las mezclas tipo BBTM B: basalto (curva azul), diabasa (curva roja).

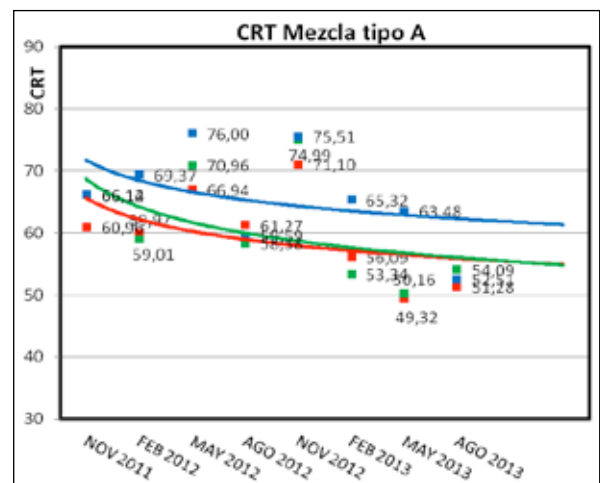


Figura 9: Curvas de evolución del coeficiente de rozamiento a nivel de campo para las mezclas tipo BBTM A: diabasa (curva roja), siderúrgico (curva verde), basalto (curva azul).

ratorio. Se decidió tomar como valores de referencia los más reducidos, medidos en agosto. Se tiene así las siguientes resistencias al deslizamiento mínimas que se dan en la tabla 9 cuando se realizó la medida en verano de 2013 y 2012:

Tabla 9: Resistencias al deslizamiento mínimas.

TRAMO	CRT MIN			
	2012		2013	
	Media	Desviación	Media	Desviación
BBTM B				
A-15 Basalto	63	3,3	57	5,1
N-I Diabasa	59	3,7	49	4,6
BBTM A				
N-I Diabasa	61	4,3	51	2,9
GI 627 Basalto	59	3,0	52	3,4
GI 627 Siderúrgico	58	4,9	54	5,0

Macrotextura de las mezclas bituminosas

La macrotextura media se resume en la tabla 10 en la que se presentan, para cada tipo de mezcla, los valores medios obtenidos mediante equipo láser.

Todas las texturas son superiores a 1,0.

Tabla 10: Macrotextura obtenida en los diferentes pavimentos.

Tipo de rodadura	Textura (valor medio)
BBTM 11A (Basalto)	1,36
BBTM 11A (Diabasa)	1,32
BBTM 11A (Siderúrgico)	1,26
BBTM 11 B (Diabasa)	1,14
BBTM 11B (Basalto)	1,07

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se observa que la máquina Wehner Schulze obtiene curvas de evolución que coinciden con las teóricas de la resistencia al deslizamiento en carretera salvo en lo que se refiere a la fase inicial de pérdida de ligante que no aparece en los resultados, aunque hay referencias de otros estudios en los que sí se encuentra esta fase.

En el ensayo aparece una caída inicial elevada seguida de una fase de reducción ligera pero continua, como es usual en carretera. Las líneas de evo-

lución de esta última fase parecen paralelas, salvo en el caso de la ofita Diabasa en la mezcla tipo A.

Tiene también interés que las mezclas que aparecen con mayor resistencia al deslizamiento son las BBTM 11B. Esto puede ser debido a una mayor presencia de huecos y macrotextura respecto a las BBTM 11A que hacen que la adherencia neumático-pavimento sea mayor.

Respecto a la naturaleza del árido, se aprecia que la mezcla que presenta más adherencia es la fabricada con árido tipo diabasa, seguido de la elaborada con árido basalto y, finalmente, la que presenta menores coeficientes de rozamiento es la que se fabrica con árido siderúrgico.

La clasificación de áridos dada por este equipo no se corresponde con los valores de coeficiente de pulimento acelerado (PSV) obtenido de los áridos de cada una de las canteras $PSV_{diabasa} < PSV_{Basalto} < PSV_{Siderúrgico}$, que asignaba al árido siderúrgico el mayor valor de PSV.

La mezcla que contiene una menor proporción de árido fino calizo, tipo B Basalto tiene un elevado coeficiente de rozamiento en laboratorio, y la que tiene mayor proporción en volumen de árido fino calizo tiene un coeficiente de rozamiento bajo, aunque estas conclusiones sobre el contenido de áridos finos calizos hay que verlas con una cierta precaución.

En la tabla 11 se muestran los resultados de resistencia al deslizamiento mínimos reflejados anteriormente en la tabla 10 junto con el número de vehículos pesados acumulados.

En relación con las medidas efectuadas en carretera y atendiendo a los valores de CRT más reducidos que son los obtenidos en verano de 2013, se ob-

Tabla 11: CRT mínimo.

TRAMO	2012		2013	
	CRT MIN	VP ACU. (x10 ³)	CRT MIN	VP ACUM. (x10 ³)
BBTM B				
A-15 Basalto	63	2,8	57	3,8
N-I Diabasa	59	3,1	49	4,7
BBTM A				
N-I Diabasa	61	1,2	51	2,7
GI 627 Basalto	59	0,7	52	0,9
GI 627 Siderúrgico	58	0,5	54	0,7

servan coeficientes de resistencia al deslizamiento entre 49 y 57. Sobre las mezclas bituminosas caracterizadas habían pasado distintos volúmenes de tráfico pesado por lo que en la comparación de resultados conviene tener en cuenta esta circunstancia.

Estos resultados se pueden comparar con los obtenidos en el equipo WS, una vez realizada la transformación a datos de CRT a 50 km/h según las ecuaciones 2 y 3. Teniendo en cuenta los datos correspondientes a agosto de 2013 se tiene:

Tabla 12: Comparación de resultados en carretera con WS.

Tipo de rodadura	CRT según WS	CRT medido en campo
BBTM 11A (Basalto)	47	57
BBTM 11A (Diabasa)	47	49
BBTM 11A (Siderúrgico)	46,5	51
BBTM 11 B (Diabasa)	46	54
BBTM 11B (Basalto)	45	52

Se observa que los valores finales de resistencia al deslizamiento dados por el equipo WS son inferiores a los medidos en carretera y a los que se obtienen usualmente en carreteras con este tipo de mezclas y áridos, lo que indica que el efecto de pulido está muy acelerado y que hay que revisar la relación contenida en la bibliografía entre el número de ciclos y el tráfico acumulado.

Por otro lado, la clasificación relativa de las mezclas bituminosas entre los dos sistemas no coincide. La mezcla tipo BBTM 11 A Basalto da los resultados más elevados en CRT y WS, pero la que da un resultado inferior en CRT, BBTM 11 A Diabasa no es la de resultado inferior en WS.

Tampoco hay coincidencia entre el orden de resultados obtenido en carretera y el que se da con el ensayo de Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV).

Los orígenes de las diferencias pueden ser los siguientes:

- Las dispersiones de los resultados en carretera y laboratorio. Se puede observar que si se consi-

deran las desviaciones mediante un análisis de los intervalos de confianza de cada uno es difícil obtener una clasificación clara de los tramos. Lo mismo puede decirse de los resultados de laboratorio.

- Las transformaciones de resultados realizadas mediante fórmulas propuestas por otros investigadores.

Dado el interés de este equipo para la estimación de la resistencia al deslizamiento y los buenos resultados obtenidos en otros países, especialmente en Alemania, se debería avanzar en el estudio de su validez en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos de la resistencia al deslizamiento, en este estudio comparativo realizado entre medidas obtenidas a nivel de laboratorio con el equipo WS y las mediciones de campo con el Griptester, se extraen las siguientes conclusiones.

- El equipo de laboratorio WS reproduce adecuadamente las curvas de evolución de la resistencia al rozamiento con respecto a las que se obtienen en carretera, es decir, en este estudio, se han observado dos etapas, una primera caída inicial brusca seguida de una etapa de reducción del coeficiente de fricción ligera pero continua como es usual en carretera.
- En líneas generales se observa que los valores finales de resistencia al deslizamiento dados por la WS son inferiores a los medidos en carretera y a los que se obtienen usualmente en carretera con este tipo de mezclas y áridos, lo que indica que el efecto de pulido está acelerado y hay que revisar la relación contenida en bibliografía entre el número de ciclos y el tráfico acumulado.
- En cuanto a la clasificación por la naturaleza de los áridos, el ensayo de coeficiente de pulimento acelerado da una clasificación que no coincide con la clasificación dada por la WS ni por las medidas de campo.

- En relación a los tipos de mezclas BBTM estudiadas, el análisis según la WS nos indica que las mezclas BBTM tipo B presentan una mayor resistencia al deslizamiento que las de tipo A, sin embargo, las mediciones de campo no son coincidentes.

En definitiva, el equipo de laboratorio WS es sin duda un equipo de gran interés para los contratistas y administraciones por la información que es capaz de aportarnos en la etapa de diseño de la mezcla bituminosa pero es necesario seguir investigando con el equipo para avanzar en el estudio de su validez ya que en otros países como Alemania y Francia se están obteniendo buenos resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) ISO 13473-1, Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles- Part-1: determination of Mean Profile Depth (1997).
- (2) C. Tourenq, D. Fourmaintraux, Road surface roughness and the properties of aggregates, Bulletin de Liaison des Laboratorios des Ponts et Chaussées 51, 61-69 (1971).
- (3) J. Bellanger, The performance and skid resistance of road surfaces, Bulletin de Liaison des Laboratorios des Ponts et Chaussées 185, 129-137 (1993).
- (4) J. Bellanger, G. Delalande, P. Dupont, Y. Ganga, Aggregate skid resistance trial sections: one-year results, Revue Générale des Routes et Aéroports, 717 40-43 (1994).
- (5) J. A. Navarro, S. Luzuriaga, J. Arnaiz, A. Ruiz Las capas de rodadura Bituminosa y la resistencia al deslizamiento. Carreteras, 180, 37-51, (2011).
- (6) J. J. Henry, W.E. Meyer, Prediction of aggregate and pavement polishing. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 29, 365-368 (1984).
- (7) J. Donbavand, D. Cook, Procedures for correcting seasonal variations, Proceedings of the conference "surface friction", 1-4 May 2005.
- (8) Minh Tan D., Zhenzhing T., Malal K. François de L. pavement polishing-Development of a dedicated laboratory test and its correlation with road results. Wear, 263 36-42, (2007).
- (9) Tang Z. PhD Thesis, LCPC, "Influence of polishing due to traffic on the evolution of pavement skid resistance" France, 2007.
- (10) Huschek, S., "Experience with resistance prediction based on traffic simulation" Proceedings of the 5th International Symposium of Pavement Surface Characteristics, 6-10 June, Toronto, Canada 2004.