

# PAVIMENTOS DE ALTA PRESTACIONES, SOSTENIBLES Y SEGUROS “ULTRAPAV”

### **JOSÉ RAMÓN LÓPEZ**

Pavasal Empresa Constructora S.A.  
jrlopez@pavasal.com

### **REBECA SASTRE**

Pavasal Empresa Constructora S.A.  
rsastre@pavasal.com

### **JULIO LÓPEZ AYERRA**

Centro Tecnológico de la Construcción  
R. Murcia – CTCON  
jlayerra@ctcon-rm.com

### **GLORIA MOTOS CARCALES**

Centro Tecnológico de la Construcción  
R. Murcia – CTCON  
gmotos@ctcon-rm.com

---

# PAVIMENTOS DE ALTA PRESTACIONES, SOSTENIBLES Y SEGUROS “ULTRAPAV”

---

## RESUMEN

La finalidad de esta comunicación es presentar los resultados provisionales del proyecto de I+D ULTRAPAV apoyado por CDTI y Fondos Europeos FEDER, ejecutado por **Pavasal Empresa Constructora S.A., y Centro Tecnológico de la Construcción R. Murcia – CTCON**, siendo el objetivo principal el desarrollo de *pavimentos asfálticos con altas prestaciones mecánicas, sostenibles y seguros para capas de rodadura de las carreteras*, capaces de reducir la cantidad de recursos naturales, disminuir el consumo de combustible de los vehículos, rebajar la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas, aumentar la seguridad vial mediante óptima resistencia al deslizamiento y evitar la emisión de partículas a la atmosfera al disminuir el desgaste de los neumáticos y del mismo firme.

En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en la primera fase del proyecto donde se ha investigado sobre qué características de diseño deben tener los pavimentos de alta sostenibilidad objetivo del proyecto.

Se han estudiado **mezclas bituminosas** susceptibles de ser usadas para capa de rodadura, como son las de tipo **hormigón bituminoso AC**; mezclas tipo **discontinuas BBTM** y las **tipo ultrafinas AUTL**.

Los ensayos y estudios realizados a las mezclas bituminosas han sido los siguientes:

- **Obtención de las fórmulas de trabajo de las mezclas.** Se han definido mezclas susceptibles

de ahorro de materiales y coste energético en la fabricación.

- **Ensayos sobre prestaciones mecánicas.** Se han realizado los ensayos relacionados con las características mecánicas perceptibles en el PG-3 para mezclas de rodadura de alta prestaciones.
- **Estudio mediante ensayos de laboratorio del comportamiento** antideslizante de las mezclas bituminosas diseñadas.
- **Cálculo de la resistencia a la rodadura de las mezclas diseñadas.** Con esta característica se puede predecir el consumo de combustible que va a provocar cada mezcla al rodar por ella.
- **Resistencia al desgaste de los neumáticos.** Con la realización de un ensayo de laboratorio hemos podido definir el comportamiento de las mezclas diseñadas al desgaste de los neumáticos al circular por ellas.
- **Resistencia al desgaste de la superficie por abrasión.** Mediante un ensayo de laboratorio se ha podido cuantificar la resistencia desgaste de las mezclas por abrasión.

Los dos últimos ensayos nos pueden predecir la tendencia de las mezclas bituminosas a la emisión de las partículas a la atmosfera procedentes de los neumáticos y del mismo firme por la acción de tráfico rodado.

Con los resultados obtenidos con estos ensayos, se han alcanzado unas conclusiones preliminares sobre cómo debe ser una mezcla bituminosa en capa de

rodadura de carreteras para ser fiable mecánicamente, sostenible medioambientalmente y adecuada para la seguridad vial.

### 1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este estudio de investigación es presentar los resultados mecánicos y funcionales del primer hito del proyecto I+D *“Pavimentos de alta prestaciones mecánicas. Sostenibles y seguros- ULTRAPAV”* apoyado por CDTI, siendo uno de sus objetivos desarrollar pavimentos de altas prestaciones mecánicas, sostenibles y seguros para capas de rodadura en las carreteras.

El cambio climático es el mayor desafío al que nos enfrentamos debido a los importantes impactos sociales y medioambientales que provoca.

La contaminación atmosférica representa un riesgo ambiental con consecuencias perjudiciales para la salud. Según el informe *“Cambio Global España 2020/50. Cambio climático y salud”*, las emisiones a la atmósfera relacionadas con el cambio climático pueden agravar los efectos de contaminación del aire sobre la salud de los ciudadanos, no solo por impacto en cambios meteorológicos sino, repercutiendo en la salud de las personas.

El tráfico rodado contribuye de diferentes maneras a la contaminación atmosférica. Es el principal causante de la contaminación en la atmósfera urbana, con una contribución superior al 75 % en aquellos contaminantes que más preocupen, como son las partículas materiales (PM10 y PM2,5) y los óxidos de nitrógeno (NOx).

Otro tipo de contaminación del tráfico rodado con origen directo es la acústica. Según numerosos estudios, el tráfico de vehículos genera el 78 % de la exposición de ruido en las ciudades.

Respecto a las mezclas asfálticas según Bardesi durante los últimos años se ha trabajado mucho en la obtención de buenas resistencias a la rodadura y mejores propiedades ópticas, pero resulta necesario continuar trabajando en otros aspectos como puede ser la reducción de consumos y desgaste de los neumáticos.

Por lo tanto, es interesante trabajar en el desarrollo de unos firmes sostenibles. Las ventajas que podremos obtener del desarrollo de estos serían las siguientes:

- Ahorros energéticos y de recursos naturales.
- Aumento de la seguridad en las carreteras.
- Disminución del consumo de combustible en los vehículos.
- Reducir la contaminación de las partículas en suspensión.
- Rebajar la contaminación acústica del tráfico.

### 2. CRITERIOS DE DISEÑO

La finalidad es desarrollar mezclas asfálticas con altas prestaciones mecánicas y sostenibles para ello se establecen como criterios de diseño de las mezclas a desarrollar los siguientes:

- **Mezclas bituminosas en caliente o semi-calientes tipo hormigón bituminoso-AC, drenante-PA, discontinuo-BBTM o ultradelgadas-AUTL.**
- **Mezclas bituminosas para capa de rodadura.**
- **Mezclas bituminosas para todo tipo de tráfico.**

Como propiedades específicas más relevantes a tener en cuenta en el diseño de las mezclas a desarrollar son las siguientes:

- Resistencia a deformaciones plásticas, a la acción del agua, y a la desintegración.

NIVELES DIARIOS DE PM<sub>10</sub> EN LAS PRINCIPALES CIUDADES ESPAÑOLAS. 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2017

Fuentes: MAPAMA, Comunidades Autónomas

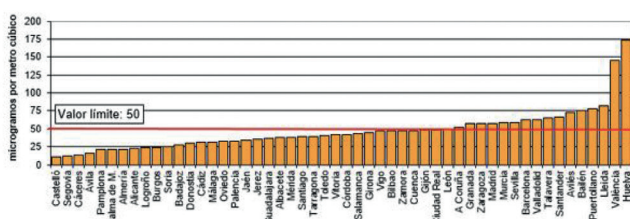


Figura 1. Niveles de PM en España

- Módulo de rigidez.
- Resistencia al deslizamiento.
- Macrorugosidad y microrugosidad.
- Propiedades acústicas.
- Resistencia a la rodadura.
- Resistencia al desgaste de los neumáticos.

### **3. MEZCLAS BITUMINOSAS SELECCIONADAS**

Como se ha comentado anteriormente, la finalidad del estudio es diseñar mezclas bituminosas para capa de rodadura de alta prestaciones, que utilice la menor cantidad de materiales y energía en su fabricación, y además buena durabilidad. Como prestaciones adicionales deben de tener alta resistencia al deslizamiento, buena resistencia a la rodadura y mínimo desgaste por abrasión de los neumáticos y del propio firme.

Según el reglamento europeo de usos de mezclas asfálticas existen nueve familias distintas de mezclas bituminosas, siendo las siguientes las que más posibilidades tienen de obtener los objetivos del proyecto:

- **Mezclas tipo AC. Mezclas de hormigón asfáltico.- UNE-EN 13108-1**
- **Mezclas tipo BBTM. Mezclas para capas delgadas.- UNE-EN 13108-2**
- **Mezclas tipo AUTL. Mezclas ultrafinas.- UNE-EN 13108-9**

Por lo tanto, las fórmulas de trabajo de las mezclas asfálticas en caliente que se van a desarrollar y estudiar en este estudio serán de tipo AC, BBTM y AUTL variando y combinando los materiales seleccionados.

Al tener como objetivo disminuir el consumo de energía en la fabricación de las mezclas, también se han realizado fórmulas de trabajo de las mezclas semicalientes mediante espumación de los betunes.

Los tipos de mezclas que se han realizado las fórmulas de trabajo han sido las siguientes:

#### **Mezclas de control:**

- **AC16 SURF 35/50 S.** Árido fino calizo y grueso porfídico.
- **BBTM-11B 45/80-65.** Árido fino calizo y grueso porfídico.

Las mezclas **AC16 35/50S** y **BBTM-11B** son mezclas que habitualmente se utilizan para capas de rodadura. Nos van a servir como mezclas control y comparar sus prestaciones con las que consigamos con las nuevas mezclas diseñadas y desarrolladas durante el proyecto.

#### **Mezclas nuevas a analizar:**

Las siguientes mezclas son ultradelgadas para capas de rodadura, que se pueden extender a un espesor entre 10 y 20 mm. Entre los husos que se van utilizar en las mezclas a estudiar están los tipos **AUTL-5**. Las mezclas están constituidas por áridos calizos o porfídicos, y tienen granulometrías cerradas o abiertas.

- **AUTL-5 45/80-65.** Árido fino y grueso calizo. Granulometría cerrada
- **AUTL-5 45/80-65.** Árido fino y grueso calizo. Granulometría abierta
- **AUTL-5 45/80-65.** Árido fino calizo y grueso porfídico. Granulometría abierta
- **AUTL-5 45/80-65.** Árido fino y grueso porfídico. Granulometría abierta
- **AUTL-5 45/80-65.** Árido fino y grueso porfídico. Granulometría cerrada.

#### **3.1 Materiales**

En la elección de los materiales (áridos y betunes) se han tenido en cuenta criterios técnicos, ambientales y económicos. Se ha elegido materiales que cumplan con los requisitos técnicos definidos en los artículos del PG-3 para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas para carreteras. Se han selec-

cionado áridos de distintas naturaleza mineralógica (calizos y pórfido) y betunes según las prestaciones mecánicas a obtener en las mezclas (betunes de penetración, modificados y aditivados). Otro aspecto que se ha tenido en cuenta para la selección de los materiales ha sido la proximidad geográfica, áridos locales.

### 3.2 Fórmulas de trabajo

Se han realizado las fórmulas de trabajo a las siete mezclas seleccionadas expuestas anteriormente, definiéndose los tipos y el porcentaje óptimo de betún, valores volumétricos, temperaturas de mezcla y compactación y la curva granulométrica obtenida con los porcentajes de las diferentes fracciones de los áridos.

En la tabla siguiente se exponen los tipos de mezclas diseñadas con sus componentes correspondientes.

Tabla 1. Tipos de mezclas para realización fórmulas de trabajo

Código	Tipo mezcla	Árido fino	Árido grueso	Granulometría
1UP	AC16 SURF 35/50 S	Calizo	Pórfido	
2UP	BBTM-11B 45/80-65	Calizo	Pórfido	
3UP	AUTL-5 45/80-65	Calizo	Calizo	Cerrada
4UP	AUTL-5 45/80-65	Calizo	Calizo	Abierta
5UP	AUTL-5 45/80-65	Calizo	Pórfido	Abierta
6UP	AUTL-5 45/80-65	Pórfido	Pórfido	Abierta
7UP	AUTL-5 45/80-65	Pórfido	Pórfido	Cerrada

A continuación, se describen las fórmulas de trabajo y las curvas granulométricas de las mezclas estudiadas.

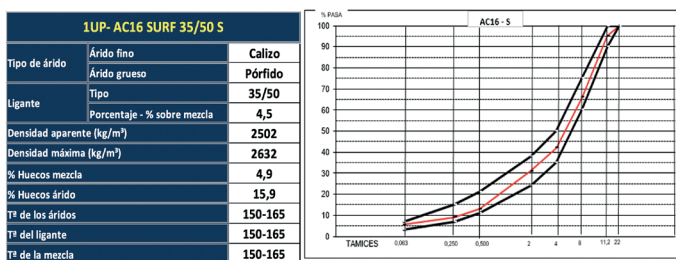


Figura 2. Fórmula de trabajo y curva granulométrica AC16-S -1UP

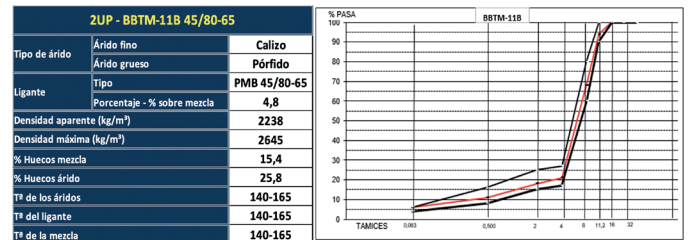


Figura 3. Fórmula de trabajo y curva granulométrica BBTM-11B -2UP

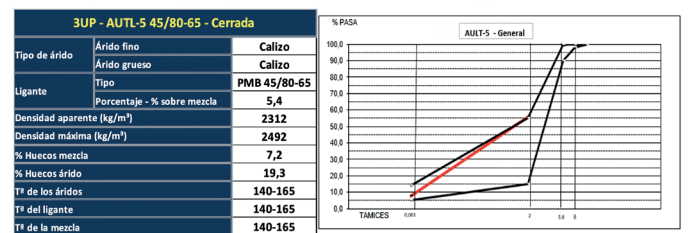


Figura 4. Fórmula de trabajo y curva granulométrica AUTL-5 – 3UP

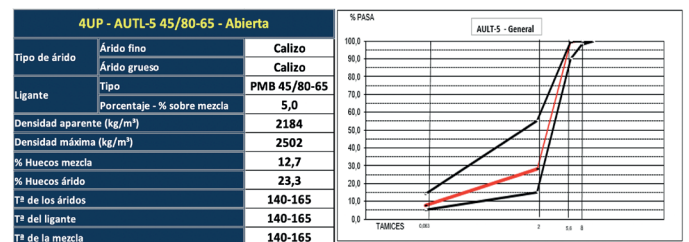


Figura 5. Fórmula de trabajo y curva granulométrica AUTL-5 –43UP

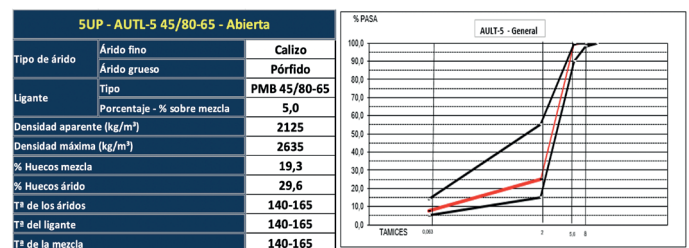


Figura 6. Fórmula de trabajo y curva granulométrica AUTL-5 – 5UP

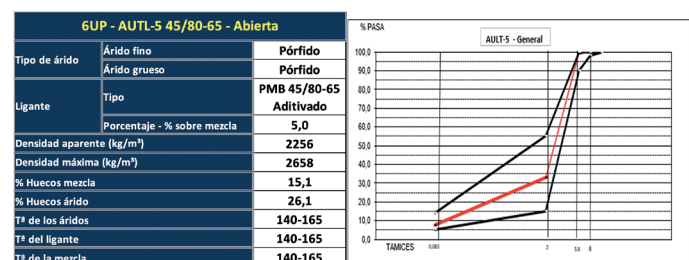


Figura 7. Fórmula de trabajo y curva granulométrica AUTL-5 – 6UP

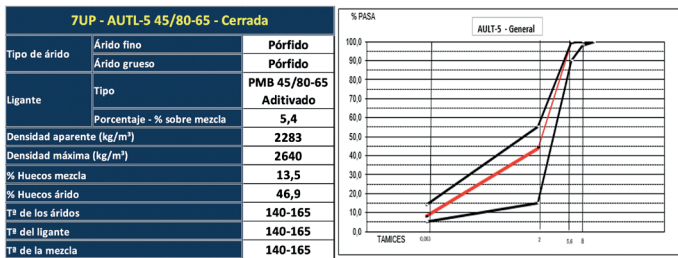


Figura 8. Fórmula de trabajo y curva granulométrica AUTL-5 – 7UP

En el estudio está previsto disminuir la energía utilizada en la fabricación de las mezclas a desarrollar rebajando las temperaturas de fabricación. La tecnología para poder disminuir las temperaturas va a ser mediante el diseño de mezclas semicalientes con espumación de los betunes. Los parámetros de las fórmulas de trabajo de las mezclas semicalientes con espuma de betún serán similares a los obtenidos en las mezclas en caliente convencionales (tipo y porcentaje de áridos, valores volumétricos, tipo y % de ligante), cambiando las temperaturas de fabricación de los áridos, betunes y mezclas. Las condiciones de espumación en las mezclas estudiadas son las siguientes:

Tabla 2. Fórmula de trabajo mezclas semicalientes

Fórmulas de T.- Mezclas semicalientes -Espumadas		
	Mezclas betún 35/50	Mezclas betún PMB 45/80-65
% agua añadida	2,5	2,5
Tª de los áridos - °C	130	130
Tª del ligante - °C	150	155
Tª de la mezcla - °C	130-135	130-135

Para comprobar y comparar las características mecánicas como las prestacionales de las mezclas diseñadas en este estudio, se han realizado las siguientes tareas:

1. Ensayos de prestaciones mecánicas. Se han realizado todos los ensayos relacionados con las características mecánicas perceptibles en el PG-3 para las mezclas de rodadura de alta prestaciones.
2. Estudio de la resistencia al deslizamiento de las mezclas diseñadas

3. Cálculo de la resistencia a la rodadura de las mezclas diseñadas. Se pretende predecir el consumo de combustible que va a provocar cada mezcla al rodar por ella.
4. Resistencia al desgaste de los neumáticos y a la abrasión de la superficie de las mezclas.

#### 4. ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES MECÁNICAS Y DURABILIDAD

En este estudio se han realizado ensayos mecánicos y de durabilidad a las mezclas diseñadas, tanto mezclas en caliente como mezclas semicalientes con betunes espumados. Se han realizado amasadas industriales en la planta asfáltica de Pavasal en Alicante de las mezclas, utilizando las fórmulas de trabajo diseñadas. Se han tomado muestras de las distintas mezclas y se han realizado ensayos para comprobar los valores volumétricos, dotación de ligante, huso granulométrico y ensayos relacionados con prestaciones mecánicas. Los ensayos se han realizado de acuerdo a la Normativa vigente especificada en el actual Pliego de condiciones particulares PG-3.

Los ensayos y resultados han sido los siguientes:

Tabla 3. Resultados de ensayos mecánicos realizados a las mezclas diseñadas

Código	Tipo mezcla	Contenido de betún UNE-EN 12697-1	Densidad aparente UNE-EN 12697-6	Huecos/mezcla UNE-EN 12697-8	Ensayo Marshall UNE-EN 12697-34		Ensayo sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12		Ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22			Ensayo de rigidez UNE-EN 12697-26
		% betún mezcla	Kg/m <sup>3</sup>	%	Estabilidad -KN	Fluencia -mm	Tracción indirecta seco -Kpa	Índice resistencia conservada -ITSR -%	WTS aire	RD	PRD	Módulo resiliente - MPA
IUP	AC16 SURF 35/50 S	4,44	2.504	4,9	15,4	2,4	2.780	97,2	0,061	3,20	5,3	10.044
IUPM	AC16 SURF 35/50 S Espumada	4,66	2.476	4,8	13,8	2,2	2.530	88,8	0,068	4,20	7,0	9.700
ZUP	BBTM-118 45/80-65	4,46	2.219	14,9			1.540	90,8	0,066	2,2	5,4	4.086
ZUP	AUTL-5 45/80-65	5,19	2.336	6,1	13,7	2,4	2.550	88,3	0,057	2,1	5,3	6.898
3UPM	AUTL-5 45/80-65 Espumada	5,01	2.313	7,4	10,2	2,4	1.490	88,1	0,059	2,6	6,6	7.875
4UP	AUTL-5 45/80-65	4,59	2.166	13,2	12,7	2,9	1.780	94,9	0,061	2,7	6,7	6.678
4UPM	AUTL-5 45/80-65 Espumada	4,77	2.302	18,8	9,6	2,5	2.040	91,8	0,072	2,3	5,6	5.131
SUP	AUTL-5 45/80-65	4,55	2.122	19,4	12,7	2,0	1.560	91,8	0,047	2,0	4,9	3.187
6UP	AUTL-5 45/80-65	4,69	2.256	15,1	11,8	2,7	1.650	100	0,067	3,0	7,6	5.019
6UPM	AUTL-5 45/80-65 Espumada	5,17	2.221	16,2	6,9	2,6	1.280	93,3	0,075	2,9	7,2	3.982
7UP	AUTL-5 45/80-65	4,92	2.276	13,7	13,3	2,1	2.180	86,3	0,074	2,3	5,9	3.159
7UPM	AUTL-5 45/80-65 Espumada	5,42	2.266	14,3	7,6	2,6	1.350	94,8	0,082	2,9	7,3	2.731

Se aprecia, que tanto las mezclas en caliente como las semicalientes con betún espumado obtienen valores óptimos en todos los ensayos realizados.

#### 5. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Una característica importante a tener en cuenta en una capa de rodadura es la resistencia al deslizamiento al paso de los vehículos, por lo que, hemos considerado necesario evaluar las caracte-



rísticas antideslizantes de las mezclas. Para ello, se han realizado varios ensayos en laboratorio:

- Medidas de resistencia al deslizamiento / derrape según UNE-EN 13036-4. Ensayo del péndulo.
- Medidas de macrotextura según UNE-EN 13036-1. Ensayo del círculo de arena.
- Determinación del rozamiento o fricción en una superficie de mezclas bituminosas tras el pulido según UNE-EN 12697-49. Método Wehner & Schulze.

De los dos primeros ensayos, se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 4. Resultados de ensayos de macrotextura y PTV realizados a las mezclas diseñadas

Código	Tipo mezcla	A. fino	A. grueso	Granulometría	Profundidad macrotextura UNE 13036-1	Resistencia al deslizamiento UNE 13036-4
					MTD	PTV
1UP	AC16 SURF 35/50 S	Calizo	Pórfido		1,1	60
1UPW	AC16 SURF 35/50 S Espumada	Calizo	Pórfido			
2UP	BBTM-11B 45/80-65	Calizo	Pórfido		1,8	63
3UP	AUTL-5 45/80-65	Calizo	Calizo	Cerrada	0,7	57
4UP	AUTL-5 45/80-65	Calizo	Calizo	Abierta	1,3	54
5UP	AUTL-5 45/80-65	Calizo	Pórfido	Abierta	1,1	55
6UP	AUTL-5 45/80-65	Pórfido	Pórfido	Abierta	0,9	60
7UP	AUTL-5 45/80-65	Pórfido	Pórfido	Cerrada	0,8	65

En los valores obtenidos se aprecia que las mezclas con árido calizo tienen coeficientes de deslizamientos menores que las mezclas que tienen árido porfídico. Hay que tener en cuenta que este ensayo se realiza con la capa de betún alrededor de los áridos, por lo tanto, nos da idea del comportamiento antideslizante de las mezclas al principio de su uso. El tamaño máximo del árido y los huecos en mezcla influyen en los valores de macrotextura. Menor tamaño máximo de árido y menos huecos en la mezcla disminuyen la macrotextura.



Fotografía 1. Detalle de la realización ensayo del círculo de arena

El siguiente ensayo efectuado para evaluar el comportamiento de las mezclas diseñadas ha sido el realizado para la **determinación del rozamiento o fricción en una superficie de mezclas bituminosa tras el pulido según UNE-EN 12697-49. Método Wehner & Schulze.**

Para realizar el ensayo se utiliza la máquina de Wehner-Schulze (WS) que permite el pulimento acelerado de una mezcla bituminosa en el laboratorio y su posterior medición de la fricción o rozamiento. Podemos estudiar y evaluar el comportamiento frente al pulimento de diferentes mezclas bituminosas antes de su puesta en obra y, predecir la evolución de la fricción con el tiempo teniendo en cuenta las características de los materiales constituyentes.

La máquina se puede programar para que se detenga después de una serie de ciclos o pasadas de pulimento. En cada parada después de pulimento, se traslada a la zona donde está el cabezal de medida de la fricción o coeficiente de rozamiento para obtener el resultado correspondiente al pulido realizado en los ciclos correspondientes.

Se pueden realizar representaciones gráficas de las curvas promedio de evolución del coeficiente de fricción Wehner Schulze-  $\mu_{W&S}$  en función del número de ciclos utilizados para el pulimento de la probeta, y así, predecir su evolución en el transcurso del tiempo.

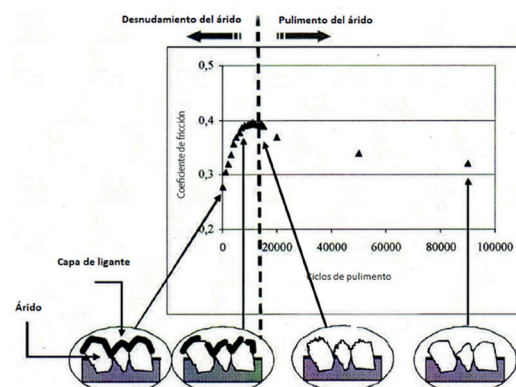


Figura 9. Representación gráfica de la evolución de la resistencia al deslizamiento en el laboratorio

En el gráfico anterior se aprecia que al principio, antes de pulimento, las muestras de las mezclas tienen la

capa de ligante, obteniéndose bajos valores de fricción. Conforme aumenta el pulido esta capa desaparece, desnudando el árido y dejando su superficie al descubierto. En este punto la fricción es la más alta. A continuación, la fricción va a depender de la capacidad de pulimento que tienen los áridos que componen la mezcla mayoritariamente. Así, conforme se pule la superficie de los áridos disminuye la fricción.

Esta evolución de la fricción a la acción del pulido nos va a predecir el comportamiento antideslizante de las mezclas asfálticas diseñadas a lo largo de su ciclo de vida.

A las siete mezclas diseñadas se le han sometido al ensayo midiendo la fricción al inicio y después de varios ciclos de pulimento: 0; 5.000; 10.000; 15.000; 20.000; 90.000 y 180.000 ciclos de pulimento. A las muestras no se les ha sometido al decapado inicial del betún con arena, para así simular la acción del tráfico desde el inicio.



Fotografía 2. Detalle de las muestras para realizar el ensayo de W&S.

La representación gráfica de los resultados de los valores de fricción a distintos ciclos de pulimento han sido los siguientes:

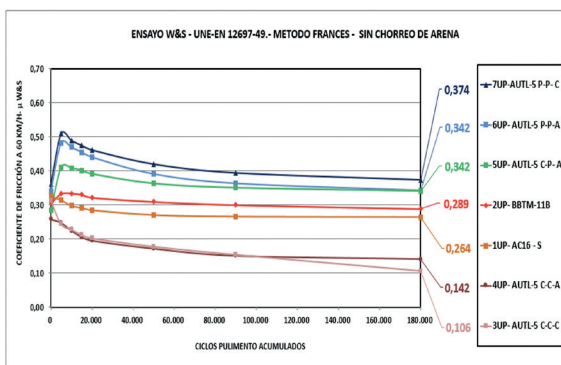


Figura 10. Representación gráfica de la evolución de la resistencia al deslizamiento en el laboratorio de las mezclas estudiadas

Según los resultados, las mezclas compuestas solo por material calizo, tienen valores de fricción después del pulimento muy por debajo que los obtenidos en las mezclas donde se incorpora parte o la totalidad de material porfídico. Además, dentro de las mezclas fabricadas con material porfídico, se puede apreciar que las mezclas ultrafinas (AUTL) obtienen valores de fricción mejores que las mezclas estándar AC16 SURF S y BBTM-11 B. Señalando que las granulometrías de tamaños máximos más reducidos, parecen favorecer la resistencia al deslizamiento.

## 6. RESISTENCIA A LA RODADURA

En esta tarea, se ha intentado cuantificar, al menos a nivel comparativo, la “resistencia a la rodadura” que ofrecerían los firmes construidos con las mezclas que se han diseñado. Dicha resistencia está relacionada con el consumo de combustible de los vehículos al rodar por dichos firmes.

La “**resistencia a la rodadura- RR**” es la resistencia que tienen los vehículos al rodar por una superficie. Según los últimos estudios, El 25-30 % del consumo de combustible de los vehículos depende de la resistencia a la rodadura (Rijkswaterstaat, Ministerio de Infraestructuras y Medio Ambiente, Delft, 2013)

Según la norma ISO 28580, la resistencia a la rodadura (RR) es la “*pérdida de energía (o energía consumida) en forma de calor por unidad de distancia recorrida*”. La RR es la energía mecánica convertida en calor por un neumático que se mueve por una unidad o distancia de carretera. Por tanto, la suma del calor absorbido por el neumático y el pavimento sería la energía consumida al rodar el neumático por un pavimento determinado y, a su vez, estaría relacionada con la resistencia a la rodadura-RR.

Para comprobar cómo influye una mezcla asfáltica en la RR y, por tanto, en el consumo de combustible, se ha diseñado un ensayo de laboratorio modificando el equipo utilizado para medir el coeficiente de pulido acelerado a los áridos (CPA) UNE-EN 1097-8.



Dicho equipo consta de una rueda de caucho que gira sobre otra rueda en la cual habitualmente se coloca el árido a ensayar, en este caso, esa rueda ha sido rellena con la mezcla bituminosa objeto de estudio. Según las dimensiones del equipo, si colocamos las ruedas de goma y pavimento a 390 rpm simulamos una velocidad de translación de 30 km/h. Si le dejamos girar durante un tiempo determinado, podremos medir el aumento de temperatura tanto de la goma de caucho como del pavimento y, por lo tanto, obtener el calor absorbido por ambos. La suma del calor absorbido por la rueda y el pavimento sería la energía consumida al rodar y este calor estará relacionado con la resistencia a la rodadura que ejerce el pavimento.

Los valores de calor absorbido se pueden obtener mediante la fórmula:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Q: Calor absorbido en julios, J

m: Masa de la rueda (caucho o pavimento), kg

C<sub>p</sub>: Calor específico del material, J/kg. °K

ΔT: Incremento de temperatura

Como se ha comentado anteriormente, la **RR** se puede definir como la pérdida de energía en forma de calor al recorrer una distancia determinada. Utilizando siempre la misma la rueda de caucho, cambiando el pavimento que queremos analizar, y conociendo la distancia transcurrida en el tiempo de giro, podemos obtener la energía mecánica perdida y convertida en calor por distancia recorrida del pavimento analizado. Este valor sería la **RR** que genera el pavimento que hemos utilizado en una de las ruedas. Los valores de la masa y calor específico de la rueda de caucho y de la rueda del pavimento son conocidos. Solo faltaría saber el incremento de temperatura de las ruedas de caucho y de pavimento para poder saber el calor absorbido por dichas ruedas.

Se han fabricado ruedas con cinco pavimentos distintos:

- AC16 SURF 35/50S -1 UP

- BBTM-11B – 2UP
- AUTL-5 – Granulometría cerradas – 3 UP
- AUTL-5 – Granulometría abierta – 5 UP
- Árido 6/12 mm pórfido

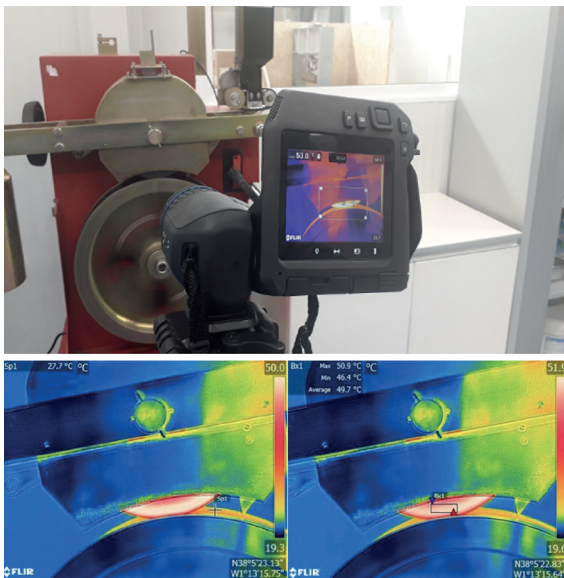
Las dos primeras son las mezclas convencionales que habitualmente se utilizan en las carreteras. Se han realizado dos mezclas ultrafinas- AUTL- 5, una con granulometría cerrada y otra con granulometría abierta para comparar con las mezclas convencionales. La última rueda es con árido desnudo de tamaño 6/12 mm, simulando una gran rugosidad.



Fotografías 3. Detalle del proceso de fabricación de las probetas para rueda de CPA

Los ensayos se realizaron durante 30 minutos. Cada 5 minutos se han tomado valores de temperatura de la rueda de caucho y de la rueda del pavimento mediante una cámara termográfica,

obteniéndose valores promedio de las temperaturas. En la rueda de caucho se seleccionaron áreas para medir promedios, y en la de pavimentos se han tomado valores puntuales.



Fotografías 4. Tomas de video de la evolución de las temperaturas. Detalles termografías

Con las medidas de temperatura de la rueda de caucho y la rueda de pavimento de cada mezcla podemos obtener el calor absorbido- Q por las dos ruedas. Con los valores de incremento de temperatura  $-\Delta T$ , la masa de cada rueda  $-m$  y su calor específico  $-Cp$ . se han calculado la resistencia a rodadura -RR a los 5, 10; 15; 20; 25 y 30 minutos dividiendo el calor absorbido por la distancia recorrida en cada tiempo (Curtosi et al., 2016).

Tabla 5. Valores del calor absorbido y RR en la rueda de caucho y rueda de los pavimentos

Tipo mezcla	RUEDA CAUCHO + RUEDA PAVIMENTO											
	5 Minutos		10 Minutos		15 Minutos		20 Minutos		25 Minutos		30 Minutos	
	Q	RR	Q	RR	Q	RR	Q	RR	Q	RR	Q-Julios	RR - J/m
AC16 SURF S	34.394	13,76	43.704	8,74	49.557	6,61	53.964	5,40	55.844	4,47	57.887	3,86
BBTM-11B	27.870	11,15	39.138	7,83	45.578	6,08	49.345	4,93	53.774	4,30	54.434	3,63
AUTL-5 -C-C-Cerrada	28.334	11,33	40.530	8,11	46.689	6,23	50.693	5,07	52.770	4,22	55.811	3,72
AUTL-5 - C-P- Abierta	30.876	12,35	40.541	8,11	48.746	6,50	52.364	5,24	56.176	4,49	56.750	3,78
Arido 6-12	35.446	14,18	44.662	8,93	53.468	7,13	57.252	5,73	58.982	4,72	60.185	4,01

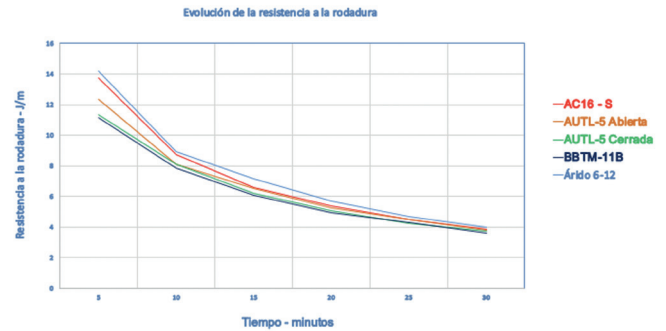


Figura 11. Evolución de la RR inducida en las superficies de los distintos pavimentos

Como podemos observar en los resultados:

- Los pavimentos con menor RR serían los contruidos con mezclas asfálticas de tipo AUTL-5 de granulometría cerrada y BBTM-11B, que obtienen valores similares. El pavimento con mayor valor de RR sería la rueda con árido 6/12 mm. La diferencia de RR entre pavimentos menos resistentes y el más resistente puede llegar al 20 %.
- Las mezclas AULT-5 de granulometría cerrada y BBTM-11B tienen entre 10-15% menos de RR que las mezclas tipo AC16-S.
- Las mezclas AUTL-5 mejoran la RR con respecto a la mezcla AC16 SURF S, ya sean de granulometría abierta o cerrada.
- El ensayo ha sido finalizado a los 30 minutos porque, tal y como se muestra en el último gráfico de evolución de la resistencia a la rodadura, la tendencia es que las mezclas mantengan su resistencia a la rodadura constante pasados dichos minutos.

## 7. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DEL FIRME Y DESGASTE DE LOS NEUMÁTICOS

Este apartado pretende estudiar como los distintos tipos de mezcla bituminosas estudiadas influyen en la generación de partículas en suspensión por la acción de la rodadura. El objetivo ha sido poder definir las características de diseño de dichas mezclas para poder rebajar las partículas en

suspensión que se generan al rodar los vehículos por firmes hechos con las mezclas bituminosas.

Según los estudios realizados, por la acción del tráfico se generan emisiones primarias de partículas en el proceso de combustión en el motor. Otras fuentes de emisión son: el desgaste de los neumáticos, las pastillas de frenos, la abrasión del pavimento y los procesos debido de resuspensión del polvo del suelo al paso de los vehículos. Las partículas emitidas por la combustión en los motores son generalmente finas (PM 2.5) y las emitidas por la abrasión de neumáticos, frenos o el firme son generalmente partículas gruesas (PM 10).

La composición química es fundamental para poder definir la procedencia de las partículas, puesto que, de un modo general, se asume que los componentes químicos de las partículas en suspensión reflejan el origen de las fuentes de emisión.

Existen estudios donde se han analizado las partículas en suspensión del tamaño PM10 emitidas en las ciudades donde se afirma que parte de las fuentes de emisión son debidas al desgaste de los frenos, los neumáticos y la misma carretera, siendo el porcentaje del desgaste de los frenos superior a los de los neumáticos y al firme, y entre estos dos, los neumáticos contribuyen más a la emisión de partículas que el mismo firme de la carretera (Panko et a., 2013).

Así, en este proyecto, se han evaluado la influencia de las mezclas estudiadas en la emisión de las partículas en suspensión. Por un lado, el desgaste de los neumáticos de los vehículos al rodar por los diferentes firmes y, por otro, la emisión de partículas del mismo firme, al ser desgastado por la abrasión del tráfico.

**7.1. Resistencia al desgaste de los neumáticos**

No existe un ensayo específico para evaluar la influencia de una mezcla bituminosas en el desgaste de los neumáticos en laboratorio. Por lo tanto, se ha simulado un procedimiento de laboratorio para poder cuantificar el desgaste de una superficie de caucho cuando fricciona con la mezcla bituminosa objeto de estudio.

Para ello, se ha utilizado el péndulo de fricción inglés TRRL que se usa para comprobar la resistencia al deslizamiento que tiene una superficie; procedimiento definido en la norma UNE-EN 13036-4.

Se ha pesado el patín, sin usar, en una balanza de precisión analítica. A continuación, se han realizado 2000 pasadas, sobre la superficie de la mezcla a estudiar, conforme establece dicha norma (Vieira et al, 2015). Una vez finalizado el ensayo se ha anotado el peso del patín alcanzado al final del desgaste y se ha relacionado con el valor del peso inicial calculándose el porcentaje de pérdida de caucho obtenido.



Fotografías 5. Péndulo de fricción. Detalle de las pastillas de caucho utilizadas y su desgaste mediante el ensayo con el péndulo de fricción

Los resultados obtenidos en las mezclas estudiadas han sido los siguientes:

Tabla 6. Pérdidas de caucho obtenidas en las distintas mezclas.

REF	TIPO MEZCLA	MACROTEXTURA	Pérdida de caucho Porcentaje-%
3UP	AUTL-S - C-C - Cerrada	0,7	3,08
4UP	AUTL-S - C-C - Abierto	1,3	3,42
1UP	AC16 - S	1,1	3,50
5UP	AUTL-S - C-P - Abierta	1,1	3,48
7UP	AUTL-S - P-P - Cerrada	0,8	3,59
6UP	AUTL-S - P-P - Abierta	0,9	3,91
2UP	BBTM-11B	1,8	3,91

Según los resultados podemos observar que existe un 28 % de diferencia entre la mezcla con mayor desgaste BBTM-11B y la menor, la AUTL con áridos calizos y granulometría cerrada. Además, se puede apreciar que ya existe una diferencia importante del 12 % entre las mezclas estándar más utilizadas AC16-S y BBTM-11B, siendo superior el desgaste en la de tipo BBTM-11B.



Así, a la vista de los resultados, podríamos definir las condiciones de diseño óptimas en una mezcla bituminosa para que provoque el menor desgaste en los neumáticos.

<b>CONDICIONES ÓPTIMAS <i>MENOR</i> DESGASTE DE NEUMÁTICO</b>	<b>ÁRIDOS CALIZOS</b>
	<b>GRANULOMETRIA CERRADA</b>
	<b>BAJA MACROTEXTURA</b>
	<b>TAMAÑO MAX. ÁRIDO PEQUEÑO</b>

Figura 12. Condiciones óptimas de diseño para mezclas bituminosas con menor desgaste de neumáticos

### 7.2 Resistencia al desgaste por abrasión de la superficie

En este apartado se intenta evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de la superficie de firmes constituidos por mezclas bituminosas, es decir, evaluar la posibilidad que tienen de emitir partículas a la atmósfera procedentes del desgaste del firme provocado por la abrasión medioambiental.

Hemos adaptado un ensayo según norma UNE-EN 1339, Anexo G, con el cual se mide la resistencia al desgaste por abrasión en las baldosas de hormigón. El ensayo se realiza desgastando la cara vista de una baldosa con material abrasivo bajo condiciones normalizadas. El material abrasivo es corindón con tamaño de grano normalizado. En nuestro caso hemos utilizado probetas de mezcla bituminosas en vez de baldosas de hormigón.



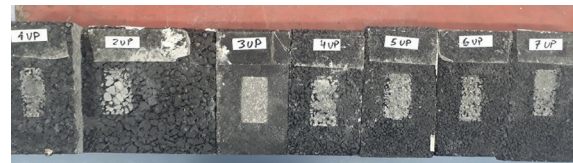
Fotografías 6. Muestras y su colocación en la máquina de abrasión

Se colocan las probetas en el carro móvil en contacto con el disco de abrasión, a continuación, se hace girar el disco y se deja pasar entre el disco y la probeta un flujo fijo de abrasivo durante un

tiempo determinado. En este caso se han marcado 5 minutos de paso de material abrasivo.

Transcurrido el tiempo predeterminado, se mide el ancho de la huella que ha provocado el disco en la probeta analizada.

Cuanto mayor sea la anchura, menor será la resistencia al desgaste por abrasión de las muestras analizadas. Y cuanto menor resistencia al desgaste por abrasión, más tendencia tendrá a desgastarse el firme construido con la mezcla al paso del tráfico y, por lo tanto, tenderá a emitir más partículas en suspensión a la atmósfera.



Fotografía 7. Muestras de las mezclas después del ensayo. Detalle de las huellas de la abrasión

Los resultados han sido los siguientes:

Tabla 7. Valores de anchura de la huella obtenidas

REF	TIPO MEZCLA	MACROTEXTURA	Anchura de huella - mm
7UP	AUTL-5 - P-P - Cerrada	0,8	30,1
6UP	AUTL-5 - P-P - Abierto	0,9	33,0
1UP	AC16 - S	1,1	33,5
3UP	AUTL-5 - C-C - Cerrada	0,7	37,6
2UP	BBTM-11B	1,8	38,5
5UP	AUTL-5 - C-P - Abierta	1,1	39,9
4UP	AUTL-5 - C-C - Abierta	1,3	40,7



Se observa que la mezcla que puede provocar más desgaste por abrasión es la AUTL-5 con áridos calizos, y la mezcla que el desgaste sería menor es la AUTL-5 con áridos porfídicos. La diferencia puede ser del 35%. Entre las mezclas estándar AC16-S y BBTM-11B, puede haber un 15% de diferencia a favor de la primera. La mezcla tipo AC-16-S provoca menos desgaste por abrasión de la superficie que la mezcla tipo BBTM-11B.

Podemos definir las condiciones de diseño en una mezcla bituminosa para que la resistencia al desgaste por abrasión de la superficie sea óptima.

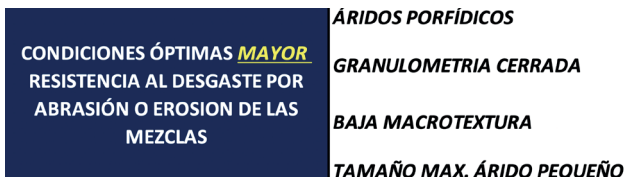


Figura 13-. Condiciones óptimas de diseño para mezclas bituminosas con menor desgaste por abrasión

Teniendo en cuenta los resultados de los dos ensayos relacionados con el desgaste de los neumáticos y la abrasión de las superficies, y por lo tanto con la predisposición de emisión de partículas en suspensión a la atmósfera, las condiciones de diseño de las mezclas bituminosas más favorables serían las siguientes:

- **Baja macrotextura**
- **Granulometrías cerradas**
- **Menor tamaño máximo de los áridos. Mezclas ultrafinas AUTL**
- **Áridos calizos o mezcla de calizo y pórfido**

## 8. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas después de las tareas y estudios de investigación realizados hasta la fecha son los siguientes:

- Para poder cumplir uno de los objetivos marcados para potenciar la sostenibilidad en la fabricación de las mezclas bituminosas, que era reducir la cantidad de recursos naturales utilizados para las capas de rodaduras y la energía consumida para su elaboración, se han seleccionado unos tipos de mezclas ultrafinas "AUTL-5" fabricadas con espumación de betún, con las cuales se puede disminuir los espesores de la capa y la temperatura de fabricación. Los resultados de los ensayos de prestaciones mecánicas realizados a las mezclas bituminosas calientes y semicalientes con espumación de betún tipo "AUTL-5" han sido satisfactorios, obteniéndose valores equiparables con los obtenidos en las mezclas convencionales tipo **AC-16** y **BBTM-11B**.
- Las mezclas tipo **AUTL-5** con material porfídico obtienen mejores valores de fricción

que las mezclas **AC-16 S** y **BBTM-11B** también con material porfídico.

- La resistencia a la rodadura - RR en las mezclas **BBTM-11B** y **AUTL-5** son similares, siendo un 10-15% menor que la RR de las mezclas **AC16-S**. En las mezclas **AUTL-5** se comportan mejor las de granulometría cerrada.
- La mezcla **AUTL-5** con calizo y granulometría cerrada es la que provoca menor desgaste de los neumáticos. La mezcla tipo **BBTM-11 B** es la de mayor desgaste. Entre las dos mezclas convencionales **AC16-S** y **BBTM-11B**, esta última tendría un 12% más de desgaste de los neumáticos
- Las mezclas **AUTL-5** con pórfido y granulometría cerrada es la que provoca menor desgaste de la superficie por abrasión. Las mezclas con árido calizo son las que tienen más desgaste por abrasión en la superficie. Entre las dos mezclas convencionales **AC16-S** y **BBTM-11B**, esta última tendría un 15% más de desgaste en la superficie por abrasión.
- Las condiciones de diseño de las mezclas bituminosas más favorables para mitigar la emisión de partículas en suspensión a la atmósfera serían las siguientes: Baja macrotextura; granulometría cerrada; tamaño máximo de árido pequeño y mezcla con áridos calizo o mezclas calizo y pórfido.
- Se puede confirmar que de las mezclas asfálticas para capa de rodadura estudiadas, la que tendría un índice de sostenibilidad más alto sería las de tipo ultrafinas **AUTL-5** con granulometría cerrada fabricadas con espumación de betún.
  - Para viales de alta capacidad (autopistas, autovías, interurbanos, etc.) los áridos deben de ser porfídicos.
  - En viales periurbanos con velocidad limitada (circunvalaciones, etc.) se deben de utilizar mezclas de árido calizo y porfídico.
  - Para viales de calles con limitación de velocidad a 30 km/h las mezclas deben de estar constituidas solo con áridos calizos (menor emisión de partículas).



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Bardesi, A. Durabilidad y prestaciones, pareja de ases en los firmes de carreteras.** ASFALTO y Pavimentación. Número 25- Volumen VII- Segundo trimestre 2017
- **Centro complutense de Estudios e Información Medioambiental.** Cambio Global España 2020/50. Cambio climatico y salud. (2012)
- **ISO 28580:2009.** Passenger car, truck and bus tyres.- Methods of measuring rolling resistance.- Single point test and correlation of measurement results.
- **M. Panko, Jennifer Chu, Marisa L., Kreider, Ken M. Unice.:** Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States. Atmospheric Environment, 72 (2013) 192-199.
- **N. Curtosi, Pablo N. Zitelli y Tomás Arechaga.** Cálculo de la resistencia a la rodadura de neumáticos mediante el método de elementos finitos. Mecánica Computacional Vol XXXIV, págs 917-933 (2016).
- **Rijkswaterstaat, Ministry of Infraestructure and the Enviroment, Delft.** Influence of road surface type on rolling resistance, Report No. M+ P. DVS.12.08.3. November 2013
- **T. Vieira, R.P. Ferreira, A.K. Kuchiishi, L.L. Bernucci, A. Sinatora:** Evaluation of friction mechanisms and wear rates on rubber tire materials by low-cost laboratory tests. Wear 328-329 (2015).