

# Resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas: Estimación de la precisión del ensayo EN 12697-22 y su influencia en la interpretación de resultados

Carmen Calvo, calrevca@jcy.l.es  
Junta de Castilla y León

Javier Loma, javierloma@padecasa.com  
Padecasa

José Luis Peña, jlpena@asefma.com.es  
Asefma

La precisión de un método de ensayo es un parámetro que permite interpretar los resultados del mismo de forma adecuada. Cuando en el año 2008 se incluyen en las especificaciones nacionales (PG-3) las referidas al ensayo de rodadura según UNE-EN 12697-22, no se dispone de información sobre la precisión de este ensayo. Por esto, en el año 2011 el grupo Aleas (Agrupación de Laboratorios de Entidades Asociadas a Asefma) inició una serie de trabajos encaminados a determinar los niveles de variabilidad del método de ensayo EN 12697-22. En publicaciones anteriores se determinó el nivel de precisión del ensayo y quedó pendiente abordar un análisis en detalle de todos los elementos que participan en el ensayo con el fin de mejorar la repetibilidad y la reproducibilidad. En este trabajo se aborda un análisis en profundidad de dichos elementos que intervienen en el ensayo lo que permite estimar valores de precisión del ensayo. De esta forma se dispone de un elemento muy importante para interpretar y evaluar los resultados obtenidos en el control de calidad de las obras. Esta publicación es la continuación del trabajo titulado "Deformación plástica de las mezclas bituminosas. Métodos de caracterización y aplicabilidad en las obras" [1], en el que a partir de datos recopilados de obras se identificaban las limitaciones de dicho método de ensayo. El trabajo experimental mostrado en el presente artículo se basa en un conjunto de ensayos intra e inter-laboratorios correspondientes a un significativo número de laboratorios. Los resultados obtenidos no han permitido identificar elementos singulares cuya modificación permitiese una mejora de la precisión del método de ensayo, por lo que los niveles de reproducibilidad obtenidos aconsejan revisar las especificaciones existentes, incluyendo rangos de tolerancia sobre los valores exigidos.

**Palabras clave:** deformación plástica, mezclas bituminosas, precisión

In 2011 the Aleas group began a series of studies aimed at determining the levels of variability of the test method EN 12697-22. In previous publication, the level of accuracy of the experiment and slope were determined with a detailed analysis of all elements involved in the test method, in order to improve repeatability and reproducibility. In this paper, deep analysis of the elements involved in the test is carried out, which allows the estimation of new precision values. In this way, a consistent tool is available to interpret and evaluate the results obtained in the quality control of the works. This publication completes the tasks detailed in the paper "Plastic deformation of bituminous mixtures, Methods of characterization and applicability in the job sites" [1], in which the limitations of this test method were identified from data collected from works. The experimental work of this paper is based on sets of intra and inter-laboratory tests corresponding to a significant number of laboratories. The results obtained have not identified single elements which modification would allow an improvement of the precision of the test method, so the reproducibility levels obtained advise to review the existing specifications, including tolerance ranges over the required values.

**Keywords:** rutting, bituminous mixtures, precision

## 1. Introducción

Las deformaciones permanentes o roderas son uno de los principales tipos de deterioro que pueden presentar las mezclas bituminosas. Se producen por la acumulación de deformaciones a consecuencia de la aplicación repetida de las cargas del tráfico, especialmente vehículos pesados a baja velocidad y a altas temperaturas [2] y pueden ser debidas a fallas en la subrasante o bien en la capa de asfalto [3]. En el primer caso, la deformación ocurre en las capas inferiores y es un problema estructural no atribuible a la mezcla bituminosa. En el segundo caso, la rodera es debida a la escasez de capacidad portante de la mezcla bituminosa, y se puede resolver con una adecuada selección de la mezcla bituminosa. Las propiedades de una mezcla bituminosa que pueden afectar a la formación de roderas están relacionadas tanto con la calidad de los materiales constituyentes, como con el diseño de la mezcla y el proceso de construcción.

En cuanto a los materiales, se ha demostrado, entre otros, la influencia de los siguientes factores: Granulometría, forma y textura de los áridos [4] [5], proporción y tipo de ligante [6] [7] [8] y relación filler/betún [9]. No es objeto de este trabajo el analizar la influencia de cada uno de los factores enumerados sino conocer la capacidad de caracterización de las mezclas bituminosas por medio del ensayo UNE EN 12697-22.

Se dispone de varios tipos de ensayos para determinar las deformaciones permanentes, que se pueden clasificar en tres grupos: ensayos fundamentales, ensayos empíricos y ensayos de simulación [10]. Entre ellos, los ensayos de simulación son muy adecuados para predecir deformaciones. A este tipo pertenece el ensayo normalizado en la EN 12697-22, de referencia para evaluar esta propiedad para el mercado CE de mezcla bituminosas y también citado como método de ensayo en los artículos 542 y 543 del PG-3 (2008). También pertenece a este tipo el ensayo NLT-173, especificado en el PG-3 (2004).

La diferencia entre los resultados obtenidos con el método NLT-173 y UNE EN 12697-22 se ha mostrado en trabajos anteriores [1] [11], observándose que la especificación actualmente en vigor es mucho más difícil de cumplir.

Con objeto de obtener más información sobre el funcionamiento del nuevo método de ensayo, dentro del consorcio Aleas (Agrupación de Laboratorios de Entidades Asociadas

a Asefma) se creó un grupo de trabajo específico. Las actividades de este grupo se desarrollaron en varias fases:

- Fase I. (2011 – 2012): Recopilación de los datos existentes para diferentes tipos de muestras.
- Fase II. 2012. Estudio comparativo de los resultados obtenidos, para mezclas tipo fabricadas en laboratorio, según las normas UNE 12697-22 y NLT-173.
- Fase III. (2012-2014). Se llevan a cabo 5 rondas interlaboratorios.
- Fase IV (2015). Estudios de precisión interna (intralaboratorio).

Los resultados de las tres primeras se han mostrado en un trabajo anterior [1].

## 2. Objetivos

El objeto de este artículo es resumir los trabajos realizados en la cuarta fase, encaminados a obtener más información sobre la precisión del método de ensayo especificado en la norma UNE-EN 12697-22 (Procedimiento B en aire), especialmente en lo referido a:

- Obtener datos de precisión intralaboratorio.
- Comparar los datos de precisión intra e interlaboratorio.
- Estudiar los principales factores que afectan a la precisión.
- Analizar las repercusiones de estos valores de precisión en la interpretación de resultados.

En la realización de este trabajo han colaborado laboratorios de 21 empresas fabricantes y laboratorios de control. No es objetivo de este trabajo evaluar las diferentes mezclas, sino la precisión del ensayo, por ello se han utilizado las mezclas utilizadas con más frecuencia.

## 3. Plan experimental

Se propuso un plan de ensayos consistente en que cada laboratorio participante seleccionara una o varias mezclas de las de consumo más habitual en cada planta, para chequear la mayoría de las tipologías de mezclas normalizadas. Cada una de estas muestras se ensayará bajo diversas condiciones:

- En condiciones de repetibilidad (mismo laboratorio, mismo operador, corto periodo de tiempo): Para ello el laboratorio fabricará seis probetas y las ensayará en el menor tiempo posible (se propone un tiempo máximo de una semana).
- En condiciones de precisión intermedia (o reproducibilidad intralaboratorio: mismo laboratorio, diferentes operadores, separadas en el tiempo). Se repite el ciclo anterior tres veces, de modo que se tengan resultados de 18 probetas. Se diferencia de la precisión interlaboratorio en que en esta última también varía el laboratorio que realiza el ensayo.

Se distribuyó a los laboratorios interesados en participar un Protocolo de validación, en el que se detallaba la secuencia de tareas a realizar y los registros a conservar:

- Datos de caracterización de la muestra: Granulometría, naturaleza del árido, contenido en ligante, tipo de ligante, densidad máxima, densidad aparente (ssd y geométrica) y contenido en huecos.
- Compactación. Adjuntar el programa de compactación y si es posible, los gráficos de compactación que genera el equipo.
- Registros de Ensayo y cálculos de precisión.

#### 4. Análisis de resultados

El ensayo UNE-EN 12697-22 proporciona información de los parámetros siguientes:

- **WTS.** Pendiente de deformación en pista, calculada como velocidad media de aumento de la profundidad de la rodera. Se mide en mm/10<sup>3</sup> ciclos de carga.
- **RD.** Profundidad de la rodera para el material sometido a ensayo en 10.000 ciclos, en mm.
- **PRD.** Profundidad proporcional de la rodera para el material sometido a ensayo en 10.000 ciclos, en %.

Con los datos proporcionados por cada laboratorio se calcularon los parámetros que definen la precisión interna de este método de ensayo en cada laboratorio:

- Desviación estándar de repetibilidad,  $s_r$ , y coeficiente de variación en condiciones de repetibilidad, CV<sub>r</sub>. Estos pará-

metros nos van a informar de las variaciones mínimas que se pueden esperar en los resultados de WTS y PRD proporcionados por un determinado laboratorio cuando ensaya una muestra. Estos valores se calculan sobre los resultados de las 6 probetas ensayadas en condiciones de repetibilidad.

- Desviación estándar de reproducibilidad intralaboratorio,  $s_R$ , y coeficiente de variación en condiciones de reproducibilidad intralaboratorio, CV<sub>r</sub>. Estos parámetros nos van a informar de las variaciones máximas que se pueden esperar en los resultados de WTS y PRD proporcionados por un determinado laboratorio. En último término nos indican las máximas diferencias entre los resultados proporcionados por un laboratorio cuando ensaya una muestra. Estos datos se calculan sobre los resultados obtenidos en 18 probetas ensayadas en condiciones de precisión intermedia o reproducibilidad intralaboratorio.

Más información sobre los diversos parámetros estadísticos citados se puede encontrar en la "Guía para la estimación de la incertidumbre en métodos de ensayo de control de mezclas bituminosas" editada por Asefma [12].

Finalmente, se compararon estos valores de precisión, obtenidos en condiciones intralaboratorio, con la precisión obtenida en condiciones interlaboratorio. Para ello, se utilizaron los resultados obtenidos en una serie de ejercicios de intercomparación organizados en España desde 2008, y que se han descrito con detalle en trabajos anteriores [1]. Al incluir este último factor de variabilidad, los resultados de precisión, expresados como coeficiente de variación o como reproducibilidad interlaboratorios, ya dan una idea de la máxima variabilidad que se esperar en los resultados de este método de ensayo.

Con los valores obtenidos en condiciones intralaboratorio se pueden establecer criterios de aceptación de resultados en cada laboratorio, mientras que con los valores interlaboratorio permiten establecer criterios para comparar resultados de diferentes laboratorios.

Los ensayos se realizaron durante el segundo y tercer trimestre de 2015. Participaron 11 laboratorios, 3 de los cuales realizaron el protocolo con dos muestras, con lo que el número de muestras ensayadas finalmente fue de 14: 10 del tipo AC16, 3 del tipo BBTM y una del tipo AC22.

En cuanto a los valores medios de WTS, 10 presentaron valores por debajo de 0.075, 3 entre 0.075 y 0.100 y sola-

# Resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas: Estimación de la precisión del ensayo EN 12697-22 y su influencia en la interpretación de resultados

mente 1 superó el valor de 0.100. En la Tabla 1 se resumen los valores obtenidos.

Los valores de repetibilidad,  $r$ , y precisión intralaboratorio,  $R$ , se han obtenido a partir de las ecuaciones siguientes:

$$r = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot s_r$$

$$R = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot s_R$$

## 4.1 Repetibilidad

### a) Valores de WTS

Los valores de CVr siguen la distribución de la Figura 1. Si se aplica la estadística de la ISO 13528 a los datos anteriores, se encuentre que L3, L9 y L6 proporcionan resultados anómalos. Si se eliminan estos valores se observa una cierta correlación entre los valores de Sr y WTS. En términos relativos, el CVr estaría entre el 12 y el 36%, con media en el 25%. En general, parece observarse una tendencia a aumentar los valores de sr al aumentar el valor de WTS (Figura 2), pero no se dispone de muchos datos de mezcla con valores altos de WTS (superiores a 0.100) que permitan confirmar esto.

### b) Valores de PRD

Los valores de CVr siguen la distribución de la Figura 3. Presentan resultados anómalos los laboratorios L7, L9, L10 y L6. Si se eliminan estos valores el valor asignado para CVr sería del 14%, variando entre el 5 y el 21%. La correlación entre los valores de desviación y PRD es menor que en el caso del WTS (Figura 4).

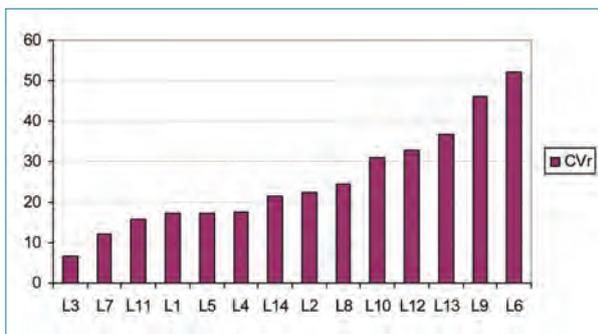


Figura 1. Distribución de valores de CVr para WTS.

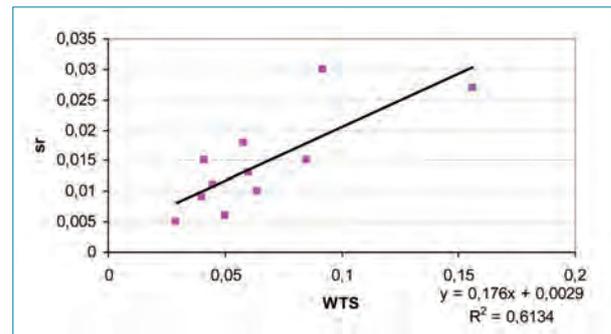


Figura 2. Desviación estándar de repetibilidad vs WTS, después de eliminar los valores anómalos.

## 4.2 Precisión intermedia

### a) Valores de WTS

Los valores de sr se encuentran entre 0,003 y 0,042, con un valor medio de 0,018. En términos relativos, el CVr estaría entre el 7 y el 56%. Si eliminamos los valores anómalos, que también ahora son L3, L9 y L6, obtenemos valores de CVr entre el 14 y el 49%, con una media del 25%. Los valores de CVr siguen la distribución de la Figura 5. También parece ob-

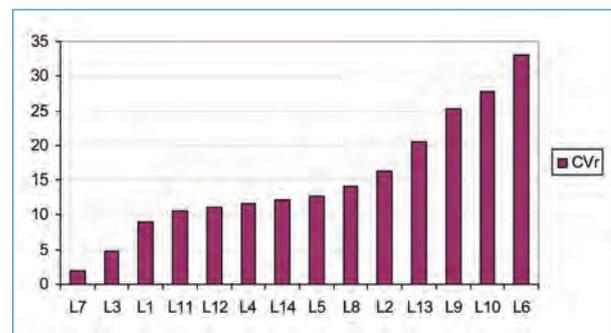


Figura 3. Distribución de valores de CVr para PRD.

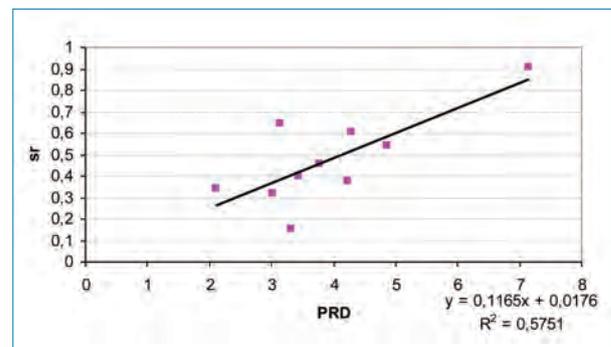


Figura 4. Desviación estándar de repetibilidad vs WTS, después de eliminar los valores anómalos.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de validación intralaboratorio.

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14
Mezcla	BBTM 11A	AC16surf	AC16	AC16bin	AC16surf	BBTM 11B	AC16surf	BBTM 11B	AC16	AC16surf	AC22bin	AC16surf	AC16surf	AC16urf
Tipo ligante	PMB 45/80-65	50/70	35/50	35/50	50/70	-	35/50	PMB 45/80-65	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70	35/50
% ligante	4,80	4,73	4,43	-	4,80	5,11	5,71	4,84	-	-	4,88	4,69	4,75	4,66
Árido	ofita	silíceo	ofita	calizo	calizo	-	pórfido	silíceo	-	-	silíceo	caliza	ofita-caliza	calizo
Densidad aparente, kg/m <sup>3</sup>	2465	2303	2464	2272	2264	2007	2450	2219	2396	2447	2377	2361	2570	2518
% huecos	7,0	6,6	4,0	9,3	5,0	18,0	4,0	15,7	-	-	4,5	2,1	3,1	5,1
WTS	0,029	0,040	0,045	0,085	0,156	0,050	0,050	0,045	0,076	0,058	0,064	0,092	0,041	0,060
s <sub>r</sub>	0,005	0,009	0,003	0,015	0,027	0,026	0,006	0,011	0,035	0,018	0,01	0,030	0,015	0,013
r	0,014	0,025	0,008	0,042	0,076	0,074	0,017	0,031	0,099	0,051	0,028	0,085	0,042	0,037
CV <sub>r</sub>	17,2	22,5	6,7	17,6	17,3	52,0	12,0	24,4	46,1	31,0	15,6	32,6	36,6	21,7
s <sub>R</sub>	0,005	0,009	0,003	0,017	0,033	0,028	0,007	0,011	0,042	0,018	0,01	0,032	0,016	0,017
R	0,014	0,025	0,008	0,048	0,092	0,078	0,020	0,031	0,118	0,050	0,028	0,089	0,045	0,048
CV <sub>R</sub>	17,2	22,5	6,7	20,0	21,2	56,0	14,0	24,4	55,3	31,0	15,6	34,8	39,0	28,3
PRD	4,235	2,114	3,312	3,441	7,147	5,661	5,767	4,297	5,115	3,018	3,014	4,871	3,143	3,769
s <sub>r</sub>	0,379	0,343	0,156	0,402	0,910	1,872	0,108	0,604	1,291	0,837	0,318	0,543	0,646	0,460
r	0,005	0,009	0,003	0,015	0,027	0,026	0,006	0,011	0,035	0,018	0,01	0,030	0,015	0,013
CV <sub>r</sub>	8,9	16,2	4,7	11,7	12,7	33,1	1,9	14,1	25,2	27,7	10,6	11,1	20,6	12,2
s <sub>R</sub>	0,41	0,42	0,18	0,45	0,99	1,94	0,15	0,77	1,51	0,86	0,69	0,99	0,70	0,51
R	1,15	1,18	0,50	1,26	2,77	5,42	0,41	2,16	4,22	2,41	1,94	2,78	1,95	1,42
CV <sub>R</sub>	9,7	19,9	5,4	13,0	13,9	34,2	2,5	18,0	29,4	28,5	23,0	20,4	22,1	13,4

NOTA: Las mezclas ensayadas han sido fabricadas con distinta composición: diferente tipo de ligante (convencional y modificado) y naturaleza de áridos (calizas, silicocalceas, pórfidos, etc).

## Resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas: Estimación de la precisión del ensayo EN 12697-22 y su influencia en la interpretación de resultados

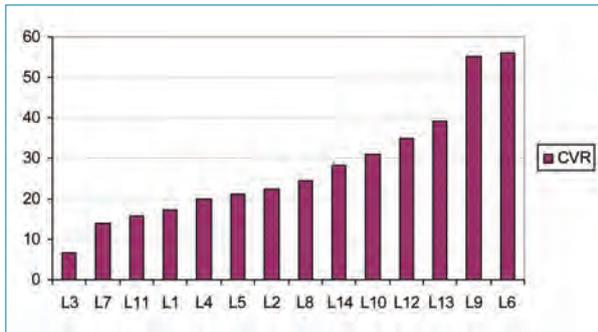


Figura 5. Distribución de valores de CVR, en %, para WTS.

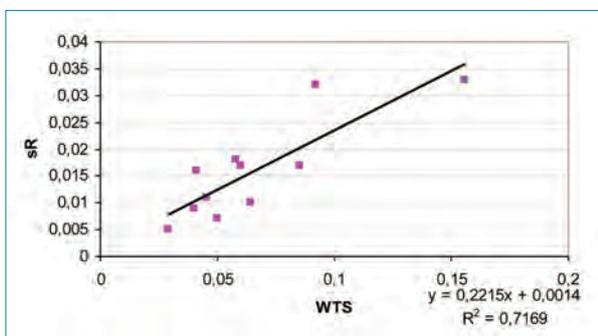


Figura 6. Desviación estándar de reproducibilidad vs WTS, después de eliminar los valores anómalos.

servarse una tendencia a aumentar los valores de  $s_r$  al aumentar el valor de WTS (Figura 6).

### b) Valores de PRD

Los valores de  $s_r$  se encuentran entre 0,146 y 1,936, con un valor medio de 0,754. En términos relativos, el CVr estaría entre el 3 y el 34%, con media en el 18%. Al igual que con los valores de desviación estándar de repetibilidad, no se observa en principio correlación entre los valores de  $s_r$  y PRD. Si eliminamos los valores anómalos (L7, L3, L6), la

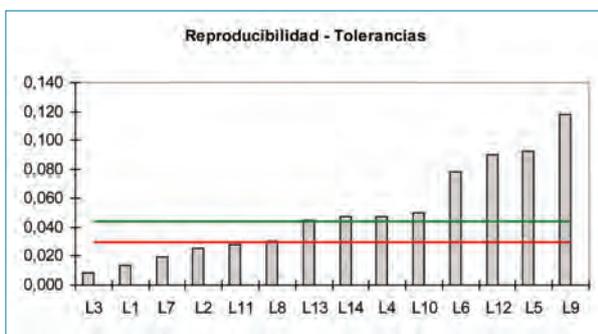


Figura 7. Valores de R para WTS frente a tolerancias.

correlación de los datos mejora ( $r_2 = 0,3297$ ), pero sigue sin ser significativa, y el valor asignado para CVr se mantiene en el 18%. Los valores de CVr siguen la distribución de la Figura 8.

Teniendo en cuenta las modificaciones de los artículos 542 y 543 del PG-3, que establecen valores límites del 5% de PRD para considerar aceptables las mezclas bituminosas, se puede establecer una tolerancia para R en torno al 2%.

Si se comparan los valores de reproducibilidad obtenidos frente a las tolerancias, obtenemos la Figura 9. Se puede ver como la tolerancia inicialmente propuesta,  $R \leq 2\%$ , la cumplen 8 de los 14 laboratorios. Probablemente asignar una tolerancia del 3% para los valores de PRD sea más realista, con el estado actual del método de ensayo.

### 4.3 Influencia de la compactación

Cada laboratorio participante ha utilizado su propia secuencia de compactación de probetas, la que utiliza de manera rutinaria para realizar este ensayo. La única condición que se exige es que se alcance al menos el 98% de la densidad de referencia. En general, la presión máxima de compactación es de 20 kN, a la que se llega en aproximadamente en 100 pasadas. La diferencia entre los laboratorios está en que en unos casos el máximo de presión se alcanza a una velocidad constante y en otros se van haciendo escalones con subidas más bruscas de presión seguidas de etapas de presión constante.

Algunos laboratorios (L4, L7 y L11) han utilizado en la compactación una chapa perforada, que colocan entre la mezcla y el rodillo. Consideran que así se consigue una mejor distribución de la carga y que la compactación es más uniforme. Estos laboratorios no presentan, en general, valores de precisión significativamente diferentes del resto.

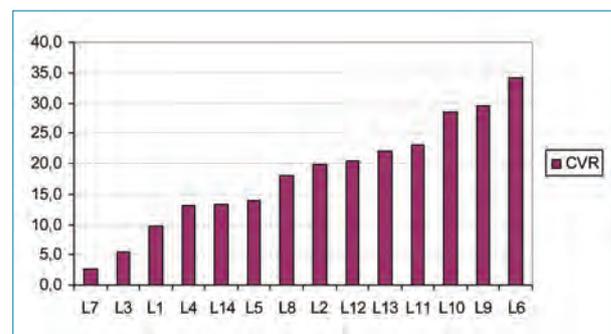


Figura 8. Distribución de valores de CVR, en %, para PRD.

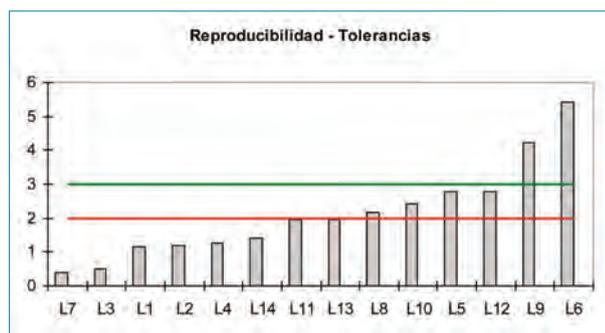


Figura 9. Valores de R para PRD frente a tolerancias.

#### 4.4 Otros factores a valorar

Tras una revisión de la norma UNE-EN 12697-22+A1:2008, se ha encontrado, en el apartado 6.3.1.7, referido a los equipos utilizados, que la tolerancia requerida para el dispositivo de medir la posición horizontal de la rueda es de  $\pm 0,2$  mm. Esta tolerancia puede conducir a altos valores de incertidumbre en la determinación de WTS y PRD, por lo que se solicitó a los laboratorios participantes que facilitasen datos acerca

de la calibración de estos equipos. En la Tabla 2 se resumen estos datos.

Todos los equipos de los que se dispone datos cumplían holgadamente la tolerancia de la norma. En la Tabla 3 se muestra cual sería la contribución a la incertidumbre debida a la calibración de este sensor en función de la incertidumbre de calibración (aplicando la metodología indicada en [11]).

Con los valores de la norma, solo esta contribución ya sería del orden de la tolerancia establecida, por lo que nos parece más adecuado establecer un valor máximo de incertidumbre de calibración en torno a 0,05 mm.

#### 4.5 Comparación de los resultados de precisión intralaboratorios e interlaboratorios

Para finalizar, se han recopilado datos de otros interlaboratorios organizados en España desde 2007 (Tabla 4). Se comprueba que los resultados son similares a los obtenidos en las 5 rondas organizadas desde ALEAS. Si representamos los datos de desviación estándar frente a WTS o PRD (Figura 10),

Tabla 2. Datos de calibración de los sensores de medida de la deformación.

Laboratorio	Sensor	Rango calibrado	Incertidumbre
L20	Novotechnik TR25	2,5 - 25 mm	0,005 mm (a 2,5 mm) 0,007 mm (a 10 mm) 0,045 mm (a 20 mm)
L7	Novotechnik TR25	2,5 - 25 mm	0,003 mm (a 2,5 mm) 0,005 mm (a 10 mm) 0,035 mm (a 20 mm)
L3	Novotechnik TR25	2,5 - 25 mm	0,010 mm (a 2,5 mm) 0,018 mm (a 10 mm) 0,045 mm (a 20 mm)
L21		1 - 25 mm	0,02 mm (a 2 mm) 0,01 mm (a 10 mm) 0,01 mm (a 20 mm)
L9	L-194	0 - 20 mm	0,03 mm (<10 mm) 0,17 mm (>10 mm)
L22			0,04 mm
L23	TRS 50	0 - 50 mm	0,03 mm (<10 mm) 0,19 mm (>10 mm)
L24			0,03 mm
L25	TRS 50	0 - 50 mm	0,02 mm (corr. max)
L4	PY2C50	5 - 50 mm	0,04 mm (corr. max)
L2		2-30 mm	0,1 mm

## Resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas: Estimación de la precisión del ensayo EN 12697-22 y su influencia en la interpretación de resultados

Tabla 3. Contribución a la incertidumbre de la calibración del sensor de deformación.

$l$ (K=2), mm	UWTS (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)
0,2	0,028
0,05	0,009

observamos una cierta tendencia, que en términos de coeficiente de variación, % CV, se traduce en los valores medios de las 18 rondas: el 39% para WTS y de 23% para PRD.

Estos valores son comparables a los publicados en estudios interlaboratorios realizados en Hungría [13], siguiendo el mismo método de ensayo. En este trabajo solo se recogen valores de PRD, y los valores de CV<sub>r</sub> se encuentran entre el 25 y el 53 %. Aquí también resaltan la carencia de datos de reproducibilidad en la norma, que no permiten una adecuada interpretación de los resultados. Para otros ensayos del mismo tipo ("Hamburg wheel tracking test"), los valores de precisión encontrados en bibliografía [14] [15] tampoco mejoran sensiblemente los encontrados en este trabajo.

En las figuras 11 y 12 se comparan los resultados obtenidos para la desviación estándar de reproducibilidad obtenidos en las pruebas de validación (intralaboratorio) y los obtenidos en los ejercicios de intercomparación realizados en las etapas anteriores (Tabla 4), tanto para WTS (Figura 11) como para PRD (Figura 12).

Para WTS, se obtienen correlaciones aceptables con s<sub>R</sub>, y se observan valores más bajos en las pruebas realizadas intralaboratorio. Para PRD las correlaciones son peores, aunque también se obtienen resultados mejores en las pruebas intralaboratorio. Estos resultados son razonables, teniendo en cuenta que se ha eliminado una fuente de variabilidad importante.

A conclusiones similares llegamos si se analizan los datos a partir de los valores medios de CV<sub>r</sub>, como vemos en la Tabla 5.

### 5. Conclusiones

De todos los trabajos expuestos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

#### En cuanto a la realización del ensayo:

- El sensor de medida de deformación presenta en general incertidumbres de calibración inferiores a la tole-

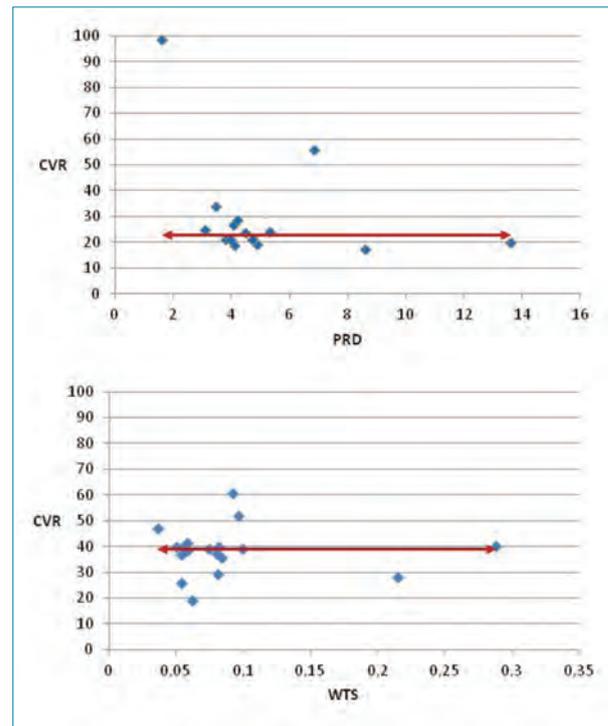


Figura 10. Valores de CV<sub>r</sub>, en %, frente a WTS y PRD obtenidos en diferentes rondas interlaboratorio.

rancia establecida en la norma de ensayo, lo cual es muy adecuado con el fin de reducir la contribución a la incertidumbre final del método. Se propone reducir esta tolerancia de calibración de 0,2 a 0,05 mm.

- Los valores de repetibilidad obtenidos en este trabajo son de 0.04 para WTS y del 1.5% para PRD.
- La precisión intermedia de los laboratorios participantes es del orden de 0.05 para WTS y del 2% para PRD.

#### En cuanto a reproducibilidad:

- Los valores medios encontrados de CV<sub>r</sub> en las 18 rondas interlaboratorios son del 23% para PRD y del 39% para WTS.
  - En cuanto a WTS, esto significa que para un valor asignado de WTS de 0,070.
  - Al ser ensayada en diferentes laboratorios, sería posible que estos obtuvieran un resultado entre 0,035 y 0,105.

Tabla 4. Resumen de los datos de precisión de rondas interlaboratorios para el ensayo EN 12697-22 realizados en España desde 2007.

Ejercicio	Fecha	Mecla	n° lab	% PRD			WTS		
				media	Sr	%CV	media	Sr	%CV
Cedex		AC16D	7	13,6	2,7	20	0,288	0,116	40
Cedex		AC22S	7	8,6	1,5	17	0,215	0,061	28
Cedex	may-08	D12	10	5,3	1,279	24	0,082	0,033	40
Cedex	jun-08	S20	10	1,6	1,577	99	0,081	0,024	30
Cedex	nov-09	AC22S	11	4,078	1,1	27	0,084	0,03	36
Cedex		BBTM11A	14	4,2	1,21	29	0,036	0,017	47
Cedex		AC22S	14	3,8	0,81	21	0,058	0,0224	39
CIESM	sep-11	AC16S	14				0,08	0,03	38
CIESM	nov-12	AC16S	14				0,05	0,02	40
Dip Alava	dic-12	AC16S	7	3,07	0,761	25	0,096	0,05	52
Aleas	2012	AC16	15	3,978	0,846	21	0,058	0,024	41
Aleas	2012	AC16	17	4,094	0,769	19	0,055	0,022	40
Aleas	2012	AC16	6	4,89	0,95	19	0,099	0,039	39
Aleas	2013	AC22	12	4,48	1,07	24	0,074	0,029	39
Aleas	2013	BBTM 11B	8	6,82	3,82	56	0,092	0,056	61
Aleas	2012	AC16	7	3,46	1,17	34	0,062	0,012	19
Dip Alava	2014	BBTM 11A BM3C	7	4,74	1,01	21	0,054	0,02	37
Dip Alava	2014	BBTM 11A BM3C	7	4,72	1,00	21	0,054	0,014	26

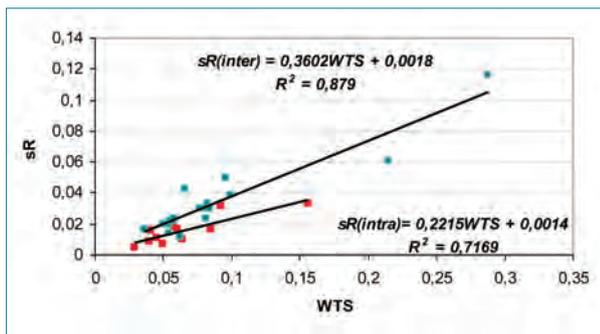


Figura 11. Comparación de la precisión obtenida en pruebas intralaboratorio e interlaboratorio, para WTS.

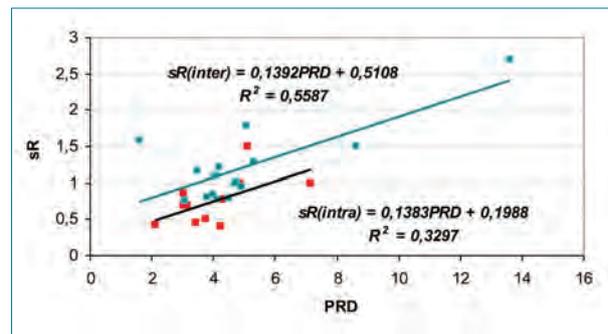


Figura 12. Comparación de la precisión obtenida en pruebas intralaboratorio e interlaboratorio, para PRD.

- Los resultados obtenidos en un laboratorio de los que realizaron su validación ( $R=0,04$ ) estarían entre 0,05 y 0,09.

La conclusión general es que en el estado actual del método los valores de reproducibilidad son muy altos, y hacen difícil la toma de decisiones, tanto para comparar los resul-

Tabla 5.- Coeficientes de variación medios obtenidos PRD y WTS en condiciones de reproducibilidad intralaboratorio e interlaboratorios.

	% CV <sub>R</sub> (PRD)	% CV <sub>R</sub> (WTS)
Intralaboratorio	18	25
Interlaboratorio	23	39

**tados obtenidos en diferentes laboratorios como en relación con el cumplimiento de especificaciones.** Con esto no se pretende decir que sea un método de ensayo inadecuado, pero sí que cuando se obtenga algún resultado fuera de las especificaciones actuales no debe valorarse a priori como un incumplimiento de sus propiedades, y si en cambio como una alerta para intensificar el control sobre este parámetro y así verificar su conformidad, en este caso para deformaciones plásticas. Por tanto, es necesario seguir trabajando para mejorar los valores de precisión.

Algunos estudios sugieren que los requisitos solicitados para el ensayo de rodadura según EN 12697-22 son más estrictos que los anteriores según NLT-173. Estos estudios indican los valores de WTS equivalentes a las anteriores prescripciones (12  $\mu\text{m}/\text{min}$ ) serían del orden de 0,150 a 0,190  $\text{mm}/10^3$  ciclos [11] [16].

### 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la inestimable colaboración de los siguientes empresas y administraciones públicas: Acciona, Asfaltos y Construcciones Elsan, Becsa, CEDEX, Centro Regional de Control de Calidad de la Junta de Castilla y León, Cepsa-Proas, Collosa, CIESM, Ditecpesa, Eiffage (plantas de Madrid, Sevilla y Valencia), Grupo Campezo, Intemac, Laboratorio General de la Diputación de Alava, Laboratorio de la Dirección General de Carreteras de la Región de Murcia, Los Serrano, Pavasal, PAS, Probisa, Repsol, Sacyr, Sorigué. En la fabricación de las muestras han participado las siguientes plantas: Eiffage Madrid, Los Serrano (Abanilla, Murcia), Asfaltos San Felices (Logroño), Asfaltos Vicalvaro (Alovera, Guadalajara), Tecnofirmes (Alcover, Tarragona)

### 7. Referencias bibliográficas

- [1] Calvo, C., Loma J., Peña J.L. (2017). "Deformación plástica de las mezclas bituminosas. Métodos de caracterización y aplicabilidad en las obra". Asfalto y Pavimentación nº 24. pp. 19-27
- [2] Suo, Z., Wong, W.G. (2009). "Nonlinear properties analysis of rutting behavior of bituminous materials with different air void contents". Construction and Building Materials, 23(12), pp.3492-3498
- [3] Padilla Rodríguez, A. (2004). "Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista". Tesina Universidad Politécnica de Cataluña
- [4] Garnica, P., Delgado H., Sandoval, C (2005). "Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas". Publicación Técnica nº 272. Instituto Mexicano del Transporte
- [5] Chen, J.S., Wong, S.Y., Lin, K.Y.(2005). "Quantification of movement of flat and elongated particles in hot mix asphalt subject to wheel load test". Materials and Structures, 38(277), pp. 395-402.
- [6] Ruiz Rubio, A., Pérez Barreno, I. (2002). "Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosa. Estudio realizado por el Foro de Ligan-tes Bituminosos" Monografía M-72. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
- [7] Lu, X., Redelius, P. (2007). "Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance". Construction and Building Materials, 21(11), pp.1961-1970
- [8] Morea, F., Agnusdei, J.O., Zervino, R. (2011). "The use of asphalt low shear viscosity to predict permanent deformation of asphalt concrete". Materials and Structures, 44(7), pp. 1241-1248
- [9] Banerjee, A., de Fortier, A., Prozzi, J.A. (2012). "Influence of operational tolerances on HMA performance". Construction and Building Materials, 27(1), pp.15-23
- [10] Bonnot, J. (1983). "Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux". RILEM, Rapport General, BLLPC 132
- [11] García Travé, G.M. (2012) "Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas. Normativa NLT - Normativa UNE-EN" Tesis doctoral. Universidad de Granada
- [12] Guía para la estimación de la incertidumbre en métodos de ensayo de control de mezclas bituminosas". 2015. Asefma
- [13] Puchard, Z; Görgeny, A. Repeatability and Reproducibility of wheel-tracking tests. %th Euroasphalt & Eurobitume Congress. Istanbul, June 2012
- [14] NCHRP (2014) Project 10-87 Precision estimates of AASHTO T 324, "Hamburg Wheel-track testing of compacted hot mix Asphalt (HMA)"

- [15] Guo, R., Prozzi, A. (2009). A statistical analysis of Hamburg Wheel Tracking Device testing results. Road materials and pavement design, 327- 335
- [16] Angelone, S., Martínez, F.O, Nosetti, R.A. 2015. "Análisis de límites de aceptación de una mezclas asfáltica en el ensayo de rueda cargada". Proceedings Congreso Iberoamericano del Asfalto. Bariloche (Argentina). pp 1461-1472

Normas citadas:

- UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: ensayo de rodadura.
- UNE-EN 12697-33:2006+A1:2007. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.
- UNE-EN 13108-1:2008. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso.
- UNE 82009-2: 1999. Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y reproducibilidad de un método de medición normalizado.
- ISO 13528 :2005. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.
- NLT 173/00. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio. Normas NLT de ensayo de carreteras. Cedex, 2000

#58

## AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

**“Un IRI peor en 1 m/km genera mayor consumo en camiones en un 1% (2% a baja velocidad). Un mantenimiento regular con mezclas asfálticas evita ese aumento de GEI” (EAPA-Road pavement industries highlight huge CO2 savings, Número 23)**

#SOSTENIBILIDAD\_Y\_MEDIO\_AMBIENTE