

# Correlación de medidas de macrotextura tomadas con el método volumétrico y con diferentes texturómetros láser

LAURA PARRA RUIZ (\*) y SIXTO J. YÁNGUAS GONZÁLEZ (\*\*)

**RESUMEN** El valor de referencia para la medida de la macrotextura superficial en la Red de Carreteras del Estado (RCE) en España es la PMT o Profundidad Media de la Textura superficial (MTD, *Mean Texture Depth*) obtenida mediante el método volumétrico, conforme a la norma UNE EN 13036-1:2010. El hecho de que sea una medida puntual que requiere la realización de cortes de carril le hace ser un procedimiento costoso, lento y peligroso. Además, los resultados del ensayo son relativamente sensibles al operador que lo ejecuta, por todo lo cual resulta un procedimiento no demasiado adecuado para auscultaciones sistemáticas, para las que se han desarrollado texturómetros láser que se pueden embarcar en vehículos que circulan normalmente por las vías, sin interferir al tráfico y que proporcionan un parámetro denominado Profundidad Media del Perfil (MPD, *Mean Profile Depth*).

De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 13473-1:2006, es posible obtener una estimación de la textura obtenida por métodos volumétricos, con el parámetro ETD (*Estimated Texture Depth*) por medio de la ecuación  $ETD = 0,8 \times MPD + 0,2$ . En el año 2008 el CEDEX realizó un estudio en el que correlacionó medidas de macrotextura obtenidas siguiendo el método volumétrico con otras obtenidas mediante diferentes texturómetros láser. Las ecuaciones que mejor relacionan la MTD con la MPD varían en función del equipo utilizado y no son de tipo lineal, como se indica en la norma, sino exponencial.

## CORRELATION BETWEEN MACRO TEXTURE MEASURES CARRIED OUT BY THE VOLUMETRIC METHOD AND BY DIFFERENT LASER TEXTURE METER

**ABSTRACT** *The reference value for the measurement of surface macro texture in the Spanish Main Road Network is the MTD or Mean Texture Depth (PMT, Profundidad Media de Textura), obtained by means of the volumetric method, in accordance with the standard UNE EN 13036-1:2010. The fact that it is a spot measurement that requires road closures makes it an expensive procedure as well as slow and dangerous. In addition to this, the test results are relatively sensitive to the operator, being the procedure not too suitable for systematic surveys. These are some of the reasons that have contributed to the development of texture meter laser devices that can be assembled on board of vehicles, circulating without interfering with the normal traffic flow and providing a parameter named the MPD (Mean Depth Profile). According to the standard UNE-EN ISO 13473-1:2006, it is possible to estimate the texture obtained by volumetric methods, with the parameter ETD (Estimated Texture Depth) through the equation:  $ETD = 0.8 \times MPD + 0.2$ . In 2008 CEDEX conducted a study that correlated macro texture measures obtained by means of the volumetric method with such carried out by different laser texture meters. The equations yielding a better relation between MPD and MTD were dependent on the measurement device used and were not linear equations type, as is it indicated in the standard, but exponential type equations.*

**Palabras clave:** Macrotextura superficial de pavimentos, Correlación entre medidas de macrotextura, Método volumétrico, Texturómetros láser.

**Keywords:** Pavement Surface macro texture, Correlation between macro texture measures, Volumetric method, Laser texture meters.

(\*) Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. Email: Laura.Parra@cedex.es

(\*\*) Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. Email: Sixto.Yanguas@cedex.es

## 1. INTRODUCCIÓN

El método de medida de la macrotextura considerado como de referencia para la Red de Carreteras del Estado (RCE) en España, es el reflejado en la norma UNE-EN 13036-1:2010 "Me-

dición de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método del círculo de arena”. Esta norma proporciona un procedimiento sencillo para la medición de la PMT o Profundidad Media de Textura (*MTD, Mean Texture Depth*), consistente en la extensión sobre la superficie a ensayar de un volumen determinado de arena o esferillas de vidrio, distribuido por medio de un pisón, en forma de parche circular. La profundidad media de la capa de material extendida, se calcula dividiendo el volumen vertido entre el diámetro del parche obtenido y representa la “profundidad de textura” media. Este método, a pesar de ser el de referencia, tiene varios inconvenientes: es un ensayo manual y lento, que implica realizar cortes de carril, lo que conlleva un elevado coste y afecta a la seguridad tanto de los operarios como de los usuarios; se trata además, de un procedimiento de medida puntual, con lo que para la determinación de la macrotextura en tramos de carretera es necesario realizar una toma de muestras a lo largo de todo el tramo para asegurar que son representativas de su totalidad; es un procedimiento que resulta relativamente sensible al operador e imposible de automatizar. Todos estos condicionantes hacen que no sea una metodología adecuada para ser empleada en la auscultación generalizada a nivel de red.

Por todo lo anterior se han desarrollado métodos alternativos para la medida de la textura, que de manera general utilizan técnicas de medición láser. Estos métodos se basan en la obtención de perfiles a nivel de la macrotextura por medición de distancias con triangulación simple utilizando un haz de luz láser y están descritos en la norma UNE-EN ISO 13473-1:2006 “Caracterización de la textura de los pavimentos mediante la medida de perfiles. Parte 1: Determinación de la profundidad media del perfil”. El resultado del ensayo, denominado con su acrónimo en inglés MPD (*Mean Profile Depth*) o profundidad media del perfil, está, al igual que la PMT, expresado en milímetros y según los estudios realizados hasta la fecha, parece que existe una buena correlación entre ambas medidas. El resultado de la estimación de la PMT con medidas realizadas con equipos láser se ha definido como ETD (*Estimated Texture Depth*) o profundidad estimada de textura.

Los beneficios que presenta el método de medida con los métodos perfilométricos son claros, pudiendo citarse entre otros los siguientes: son rápidos y pueden ser medidos con vehículos multifunción; son poco sensibles a la intervención del operador (influye la habilidad para conducir centrado en el carril); son totalmente automáticos; permiten la toma de un gran número de muestras; y no es necesario realizar cortes de carretera con lo que resulta un método mucho más seguro que el método volumétrico. A la vista de todas estas consideraciones, el método perfilométrico se ha impuesto como el de medida habitual de la macrotextura en los firmes de carretera.

La relación entre las mediciones con los dos métodos no resulta clara y la única referencia existente figura en la citada norma UNE-EN ISO 13473-1:2006. El presente artículo muestra los resultados obtenidos a partir de las medidas tomadas con texturómetros láser instalados en diferentes equipos de auscultación y su comparación con las medidas realizadas siguiendo el método volumétrico, para observar si los valores estimados con la MPD son comparables a los obtenidos con los ensayos del círculo de arena, PMT. Este estudio se realizó en el marco del Convenio firmado entre la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), para la “Evaluación del Coeficiente de Rozamiento Transversal y de la Textura (MPD) en la Red de Carreteras del Estado”.

## 2. DEFINICIÓN DEL ENSAYO COMPARATIVO

### 2.1. OBJETIVO

El estudio tuvo como objeto establecer la relación existente entre los parámetros PMT, resultado del ensayo del círculo de arena, según la norma UNE-EN 13036-1:2010, y la MPD (*Mean Profile Depth*), calculada por medio de texturómetros láser que miden conforme a la norma UNE-EN ISO 13473-1:2006. Esta última norma establece la posibilidad de convertir la MPD medida por medio de los texturómetros láser en un va-



FIGURA 1. Ensayo del círculo de arena.

lor equivalente al que se obtendría por medio del círculo de arena, denominado Profundidad Estimada de Textura o ETD (*Estimated Texture Depth*), utilizando la siguiente ecuación:

$$ETD = 0,8 \times MPD + 0,2 \quad (1)$$

Para la determinación de la macrotextura superficial en las carreteras de su competencia (RCE), la Dirección General de Carreteras realiza anualmente campañas de auscultación en las cuales se emplean texturómetros láser embarcados en equipos de alto rendimiento (SCRIM o perfilómetros), obteniendo por tanto la macrotextura como valor de MPD. Sin embargo, el parámetro de referencia para la determinación de la macrotextura en las prescripciones normativas (PG-3) se refiere a la PMT, por lo que se decidió estudiar en profundidad la relación entre ambos parámetros, cuestionando la idoneidad de la relación propuesta en la Ecuación (1).

## 2.2. METODOLOGÍA

### MEDIDAS DE TEXTURA CON ENSAYOS DE CÍRCULO DE ARENA

El método de ensayo para la determinación del valor de profundidad de textura, PMT, fue el citado en la norma de ensayo UNE-EN 13036-1:2002, que es prácticamente similar al descrito en la norma UNE-EN 13036-1:2010. De acuerdo con la citada norma de ensayo, para la determinación de la textura se utilizaron esferas de vidrio calibradas.

Teniendo en cuenta que el valor de la profundidad de textura PMT presenta una gran dispersión, es necesario realizar un gran número de ensayos por cada uno de los tramos de medida, con el fin de conseguir un valor suficientemente representativo del mismo. Por ello, se decidió realizar dentro de cada tramo un ensayo aproximadamente cada 100 metros, constando a su vez cada ensayo de cuatro determinaciones. De esta manera en cada una de las localizaciones seleccionadas, de aproximadamente 1.000 m, se realizaron 40 determinaciones simples.

### MEDIDAS DE TEXTURA CON TEXTURÓMETROS LÁSER

La norma de ensayo para la determinación del valor de la MPD a partir de los perfiles obtenidos con texturómetros láser es la UNE-EN ISO 13473-1:2006.

Normalmente, los texturómetros láser suelen estar montados en equipos multifunción, que realizan simultáneamente la medida de otros parámetros. En este caso, los equipos que realizaron la medición fueron de dos tipos:



FIGURA 2. Equipo SCRIM del CEDEX (2008).

- a) Equipos SCRIM de medida del coeficiente de rozamiento transversal: estos equipos constan de un láser de medida de la textura situado delante de la rueda de ensayo para la medida del deslizamiento. La línea sobre la que miden está aproximadamente situada sobre la rodada derecha del carril de medida.

En el ensayo participaron 3 vehículos SCRIM (1 del CEDEX, y los otros de las empresas GEOCISA y EUROCONSULT) y se efectuaron dos pasadas a tres velocidades diferentes: 40, 50 y 60 km/h. El motivo de medir la macrotextura a diferentes velocidades fue estudiar, de forma complementaria, cómo influye la velocidad de ensayo en el valor de la MPD obtenido. Todas las medidas se realizaron sin verter agua en el firme, para evitar que el lavado de la carretera provocado por tantas pasadas pudiese modificar de alguna manera los resultados.

- b) Perfilómetros Láser para medida de la regularidad superficial: estos equipos, cuya principal misión es la obtención de perfiles longitudinales y transversales para el cálculo de los índices de regularidad, suelen estar equipados con un láser adicional para la medida de la textura, situado también en la zona de la rodada derecha del carril de medida.

En el ensayo participaron 3 perfilómetros láser (1 del CEDEX y 2 de la empresa AEPO). Los ensayos con estos equipos se realizaron a una velocidad de 80 km/h, efectuando dos pasadas en cada tramo (uno de ellos realizó tres pasadas). De forma adicional, el perfilómetro del CEDEX recogió datos de textura a 40 km/h en algunos de los tramos de ensayo, tomando para ello las precauciones de seguridad necesarias para evitar posibles colisiones por alcance con otros vehículos, con el fin de observar si la variación de la velocidad podía incidir en el resultado de las mediciones con perfilómetros láser.

## 2.3. ELECCIÓN DE LOS TRAMOS DE ENSAYO

Para la selección de los tramos de ensayo se deben tener presentes varias consideraciones: los tramos deben presentar un acabado superficial homogéneo de manera que los resultados de las mediciones no presenten grandes variaciones y el conjunto de valores medios de todos los tramos elegidos ha de abarcar un rango suficientemente grande de valores de textura, de forma que permitan realizar una correlación fiable entre las variables objeto de estudio (PMT y MPD).



FIGURA 3. Perfilómetro Láser del CEDEX.

Es importante tener en cuenta que el valor de la profundidad de textura, ya sea medido con métodos perfilométricos o volumétricos, presenta una gran dispersión, incluso cuando se mide en superficies con unas características constructivas homogéneas. Esto es perfectamente normal, pero implica que no sea posible comparar directamente medidas puntuales tomadas con uno y otro método. Así, la manera adecuada de realizar las comparaciones, ha de ser forzosamente apoyada en la hipótesis de que las medidas realizadas en un determinado tramo sean una muestra aleatoria de la población total, que estaría representada por la media de los infinitos ensayos que se podrían realizar en el citado tramo. Por tanto, es necesario verificar que los tramos elegidos son estadísticamente homogéneos, para que puedan ser representados con un valor medio y una dispersión determinada.

Para la definición de los tramos de ensayo, se partió de la información de la MPD media por kilómetro y su desviación típica, recogida en la base de datos de las campañas de auscultación del SCRIM del CEDEX, correspondiente al año 2004, y la del SCRIM del Ministerio de Fomento, correspondiente al año 2003. Para realizar la selección definitiva de los tramos de ensayo se siguió el proceso que se detalla a continuación.

#### DEFINICIÓN DE INTERVALOS

En primer lugar, se definieron los intervalos "objetivo", con la intención de encontrar al menos un tramo de ensayo de aproximadamente un kilómetro, con un valor medio de MPD (expresada en milímetros) comprendida en cada uno de ellos.

0,0	< MPD ≤	0,5
0,5	< MPD ≤	1,0
1,0	< MPD ≤	1,5
1,5	< MPD ≤	2,0
	MPD >	2,0

Es importante destacar que se encontraron muy pocos kilómetros con valores de MPD media mayores de 3 mm. En toda la base de datos estudiada, de un total de 31.752 registros procesados, tan sólo se encontraron tres con un valor superior al buscado. Se decidió por tanto descartar los tramos

con estos valores de MPD media ya que tenían unas desviaciones estándar respecto de la media muy elevadas, que indican claramente una falta de homogeneidad notable que en general son indicio de tramos con deterioros superficiales apreciables y que lógicamente no resulta aconsejable incluir en el estudio.

#### CRITERIOS DE BÚSQUEDA

En la base de datos utilizada, que contenía los valores de MPD media cada 20 m, se eliminaron los intervalos entre puntos kilométricos con una distancia inferior a 800 m, con el fin de que los tramos seleccionados tuviesen unas condiciones homogéneas. También se eliminaron del análisis los valores correspondientes a las carreteras de calzada única, ya que la realización de ensayos de círculo de arena en este tipo de vía es más complicado que en calzadas con varios carriles por sentido de la circulación.

Posteriormente, se eligieron las provincias más cercanas a Madrid, con el objeto de minimizar desplazamientos durante la ejecución de los ensayos. Las provincias consideradas fueron: Ávila, Guadalajara, Madrid, Segovia y Toledo. De entre todas ellas, las únicas en las que se encontraron valores de MPD en todos los intervalos definidos fueron Madrid y Toledo, por lo que las demás se descartaron del análisis.

Finalmente, se decidió también eliminar del análisis las carreteras M-40, M-21 y los tramos de las autovías radiales a menos de 20 km de la capital, por soportar una densidad de tráfico muy elevada.

#### HOMOGENEIDAD DE LOS TRAMOS

La homogeneidad de los tramos es un factor muy importante a tener en cuenta, ya que se comparan los valores medios por kilómetro. Por ello, si el kilómetro es homogéneo existirá una mayor garantía de que los círculos de arena tomados sobre el pavimento sean representativos del total del tramo, de forma que las conclusiones que se obtengan serán también más fiables.

Teniendo esto en cuenta, de todos los tramos de carretera de doble calzada existentes en la base de datos correspondientes a Madrid y Toledo, sólo se eligieron aquellos en los que la desviación estándar del kilómetro fuese menor del 10% del

Carretera	Denominación	Rodadura	Tramo	Calzada	MPD (mm)
A-3	A3-39	Hormigón	p. k. 39,400 a 38,400	2	0,37
A-3	A3-29	Hormigón	p. k. 29,000 a 28,000	2	0,38
A-1	A1-58	S-12	p. k. 58,200 a 59,300	1	0,59
A-1	A1-84	D-20	p. k. 84,000 a 85,000	1	0,61
A-1	A1-74	D-20	p. k. 74,800 a 75,800	1	0,73
A-1	A1-61	D-20	p. k. 61,300 a 62,600	1	0,84
A-6	A6-27	PA-12	p. k. 27,000 a 28,000	1	1,23
A-6	A6-30	PA-12	p. k. 30,800 a 29,700	2	1,28
A-6	A6-34	PA-12	p. k. 34,000 a 35,000	1	1,36
A-6	A6-64	M-10	p. k. 44,000 a 45,000	1	1,57

TABLA 1. Tramos de ensayo seleccionados.

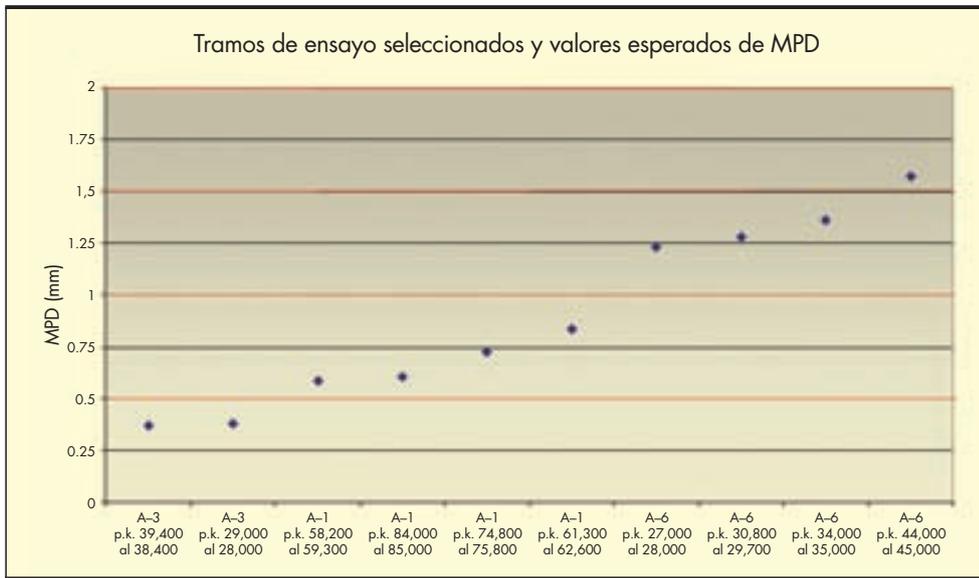


FIGURA 4. Tramos de ensayo seleccionados.

valor medio de la MPD. Como resultado, se encontró que en Madrid no había kilómetros “homogéneos” en el intervalo MPD mayor que 2,0 mm, y en Toledo no había kilómetros “homogéneos” en el intervalo de MPD comprendido entre 1,0 y 1,5 mm.

#### SELECCIÓN DE LOS TRAMOS DEFINITIVOS

Sobre los itinerarios pre-seleccionados, se realizó una medida con el perfilómetro láser del CEDEX. A partir de los valores obtenidos de MPD cada 20 metros, se efectuó la segmentación de los mismos en sectores homogéneos, por medio de un tratamiento estadístico (YANGUAS, 2008) que permite dividir series de datos en segmentos homogéneos. De esta forma, los datos de MPD medidos se dividieron en sectores homogéneos respecto a la variable MPD (independientemente de los hitos kilométricos), obteniendo como resultado un elevado número de tramos de longitudes diversas y valores medios, lógicamente muy diferentes entre sí.

De entre los tramos obtenidos con este procedimiento, se seleccionaron únicamente los que tenían una longitud superior a los 1.000 m. Una vez hecho este filtrado, se encontró que no había tramos que cumplieren todas las condiciones con valores elevados de la variable MPD.

Finalmente, se decidió seleccionar los mostrados en la Tabla 1. Estos tramos cumplían las condiciones de homogeneidad establecidas y daban un margen suficiente de recorrido de la variable de ensayo, siendo los únicos inconvenientes que no hay valores de MPD media mayor de 2,0 mm y que los valores de MPD no están perfectamente distribuidos a lo largo del recorrido de la variable. El hecho de no encontrar tramos homogéneos suficientemente largos y con valores de MPD mayores de 2,0 mm, probablemente se deba a que los valores elevados de MPD se obtienen sólo en tramos con dispersiones muy elevadas, que indican muy posiblemente, que proceden de tramos con deterioros superficiales y que en la práctica son medidos por los láseres como de elevados niveles de profundidad de textura.

En cualquier caso, en la Figura 4 se observa cómo se distribuyeron los valores de la MPD en los diferentes intervalos definidos, consiguiéndose una continuidad a lo largo del recorrido de la variable bastante aceptable.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. ENSAYOS DE LA MANCHA DE ARENA

Los ensayos de mancha de arena fueron realizados en octubre de 2007 por la empresa GEOCISA, contratada a tal efecto en base al correspondiente concurso público, estando supervisados los trabajos en todo momento por un técnico del CEDEX. En cada uno de los tramos seleccionados se realizaron un total de 10 ensayos que constan de 4 determinaciones simples, situados a intervalos de unos 100 m, realizando de esta manera un total de 40 manchas de arena por tramo de ensayo.

#### RESULTADOS OBTENIDOS

En cada uno de los tramos de estudio, se analizaron detalladamente los resultados obtenidos en los ensayos, calculando su media y desviación típica, el valor del intervalo que contiene al 95% de los datos, el intervalo de confianza al 95% del valor medio del tramo y los valores límites para la determinación de datos aberrantes, estimado este en tres desviaciones típicas. A modo de ejemplo, se presenta en la Tabla 2 la totalidad de los resultados obtenidos para uno de los tramos situado en la autovía A3. Tan solo un dato, con un valor de 0.509 mm, fue considerado como aberrante y eliminado de los cálculos.

En la Tabla 3 se muestra un resumen general de los resultados obtenidos en todos los tramos de ensayo, en la que se incluye: la media del tramo y su desviación típica, el valor del intervalo que contiene al 95% de los datos y el intervalo de confianza al 95% del valor medio del tramo, una vez excluidos del cálculo los datos aberrantes.

Como era de esperar, en la mayoría de los tramos se encontraron muy pocos valores puntuales, entre cero y cuatro valores, fuera del intervalo de confianza del 95%, y en sólo dos de los tramos se obtuvo un valor aberrante que apenas influye en el valor medio obtenido. Esto parece ser indicativo de que los tramos seleccionados eran bastante homogéneos y que proceden de muestras normales.

#### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con el fin de detectar si los valores tomados de la variable de ensayo (PMT), cumplen la hipótesis de que son muestras aleatorias de poblaciones normales, se efectuaron varios test estadísticos.

Carretera		A -3		
Tramo		A3-39		
Fecha de ensayo		25-9-07		
95% [ 0,168 - 0,378 ]		Aberrantes >0,434 ó <0,113		
PMT Média		0,273 mm		
Desviación Estandar		0,054 mm		
Intervalo Sup. 95%		0,290 mm		
Intervalo Inf. 95%		0,257 mm		
P.K.	1ª	2ª	3ª	4ª
39+446	0.292	0.285	0.289	0.311
39+336	0.282	0.311	0.319	0.315
39+236	0.354	0.282	0.275	0.275
39+136	0.220	0.243	0.246	0.251
39+026	0.172	0.209	0.235	0.233
38+1100	0.220	0.225	0.228	0.246
38+100	0.311	0.266	0.323	0.303
38+900	0.235	0.246	0.289	0.509
38+800	0.246	0.311	0.275	0.282
38+700	0.233	0.251	0.266	0.266

**TABLA 2.** Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de círculo de arena en el Tramo A3-39.

Tramo	PMT (mm)			Intervalo al 95%		Int. Con. PMT media 95%	
	Media	Desv	Desv/Media	nf	Sup	Inf	Sup
A3-39	0.273	0.054	20%	0.168	0.378	0.257	0.290
A3-29	0.288	0.083	29%	0.126	0.451	0.263	0.314
A1-84	0.420	0.059	14%	0.304	0.536	0.402	0.438
A1-58	0.502	0.086	17%	0.332	0.671	0.475	0.528
A1-74	0.773	0.099	13%	0.579	0.966	0.742	0.803
A1-61	0.623	0.076	12%	0.474	0.772	0.599	0.647
A6-27	1.727	0.198	11%	1.339	2.116	1.666	1.789
A6-30	1.708	0.180	11%	1.356	2.060	1.652	1.764
A6-34	1.720	0.116	7%	1.493	1.947	1.685	1.756
A6-44	2.404	0.372	15%	1.675	3.134	2.289	2.520

**TABLA 3.** Resultados obtenidos en los ensayos de círculo de arena.

Como las muestras proceden de distintas poblaciones normales, no se puede tomar directamente todo el conjunto de valores sin más, sino que es necesario obtener los residuos normalizados y sobre estos realizar un test de homogeneidad. Para realizar la normalización de los residuos se utilizó la ecuación:

$$Z = \frac{(X_i - \mu)}{\sigma} = \frac{(X_i - \bar{X})}{S} \quad (2)$$

Sobre el conjunto de residuos normalizados con la Ecuación (2), se realizó el test de Kolmogorov-Smirnov, que com-

para las funciones de densidad de la muestra con la que se pretende comparar, en este caso, una Normal N (0,1).

El resultado de los test, que se realizaron a todas las muestras de datos separadas por kilómetro, y al conjunto de residuos en su conjunto, fue en todos los casos, que la hipótesis del test se acep-

taba, es decir, que los datos se distribuyen según una distribución normal. Por todo ello, se puede concluir que los tramos han sido correctamente elegidos y que los valores medios y sus dispersiones son perfectamente asumibles a poblaciones normales. Un resumen de los resultados obtenidos se recoge en la Tabla 4.

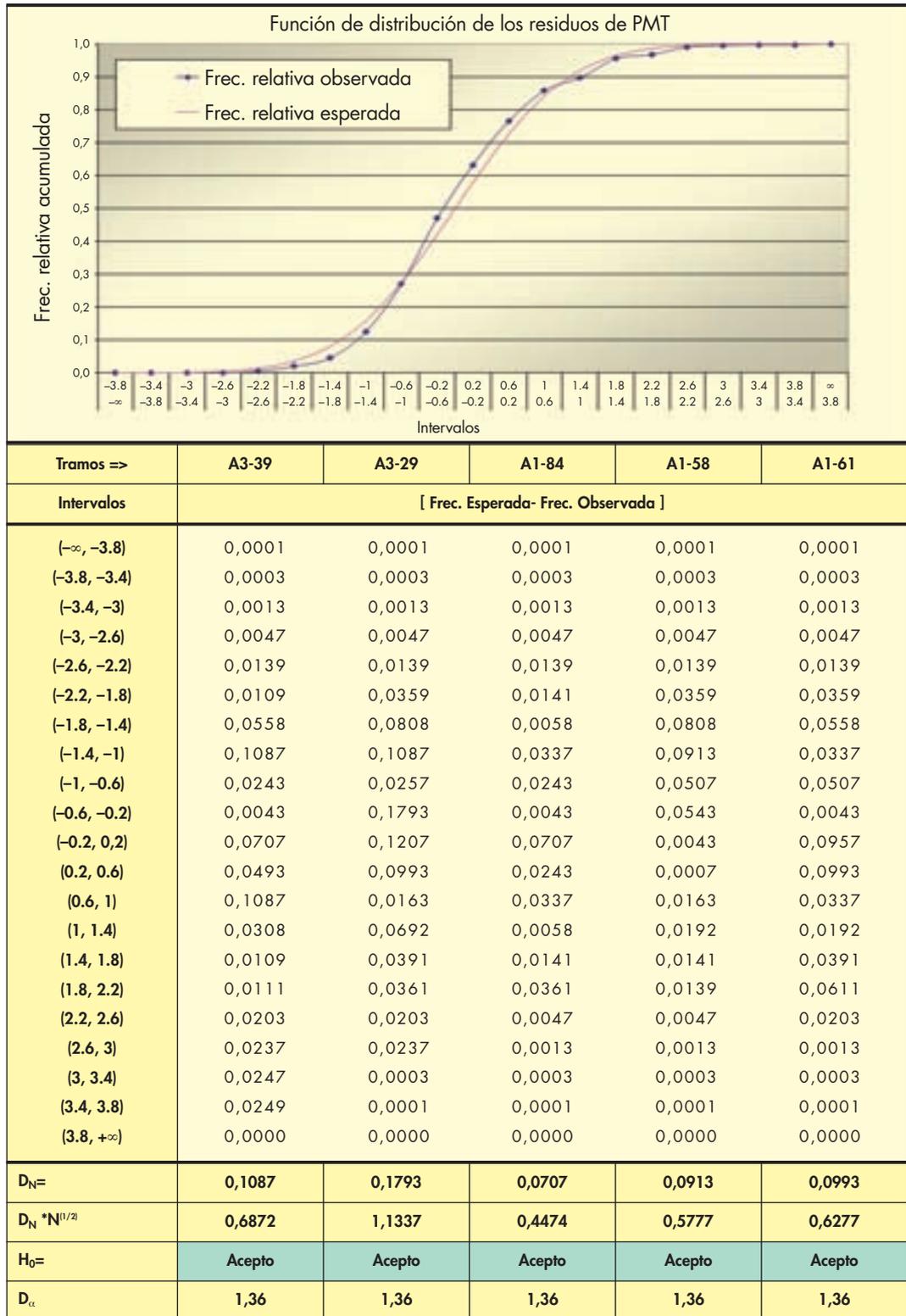


TABLA 4. Resultados del Test de Kolmogorov ensayos de círculo de arena).

### 3.2. ENSAYOS CON MÉTODOS PERILOMÉTRICOS

La medida de la textura con los equipos SCRIM se llevo a cabo en noviembre de 2007 y con los equipos de medida de la regularidad superficial en abril de 2008. A pesar de que la separación temporal en la toma de muestras pueda parecer elevada, hay que considerar que el parámetro de medida, la MPD, permanece prácticamente constante durante la vida del firme, solo disminuyendo

de manera apreciable en las semanas posteriores al extendido.

#### RESULTADOS OBTENIDOS

De la Tabla 5 a la 7 se pueden ver los valores de la MPD recogidas por los equipos SCRIM a las velocidades de 40 (MPD40), 50 (MPD50) y 60 km/h (MPD60), en las distintas pasadas efectuadas (1 y 2).

	SCRIM 1					
	MPD401	MPD402	MPD501	MPD502	MPD601	MPD602
A3-39	0,464	0,454	0,476	0,498	0,482	0,469
A3-29	0,392	0,386	0,395	0,416	0,428	0,438
A1-84	0,764	0,760	0,751	0,846	0,747	0,768
A1-58	0,935	1,024	1,021	0,940	1,026	0,976
A1-61	1,071	1,120	1,114	1,077	1,150	1,165
A1-74	1,062	1,129	1,181	1,209	1,150	1,177
A6-30	2,091	2,013	2,147	2,213	2,200	2,203
A6-27	1,966	2,021	1,956	2,037	1,984	2,064
A6-34	1,907	2,004	1,950	1,995	1,964	2,004
A6-44	2,113	2,131	2,111	2,155	2,186	2,160

TABLA 5. Resultados MPD (mm) Equipo SCRIM 1.

	SCRIM 2					
	MPD401	MPD402	MPD501	MPD502	MPD601	MPD602
A3-39	0,537	0,523	0,564	0,543	0,595	0,566
A3-29	0,523	0,508	0,549	0,536	0,565	0,573
A1-84	0,675	0,679	0,704	0,701	0,736	0,728
A1-58	0,746	0,748	0,772	0,781	0,799	0,806
A1-61	0,908	0,939	0,914	0,952	0,951	0,965
A1-74	0,920	0,918	0,965	0,949	0,978	0,985
A6-30	1,246	1,265	1,263	1,270	1,290	1,303
A6-27	1,128	1,139	1,161	1,168	1,203	1,196
A6-34	1,215	1,213	1,245	1,246	1,267	1,276
A6-44	1,297	1,297	1,312	1,350	1,360	1,367

TABLA 6. Resultados MPD (mm) Equipo SCRIM 2.

	SCRIM 3					
	MPD401	MPD402	MPD501	MPD502	MPD601	MPD602
A3-39	0,864	0,870	0,929	0,946	0,906	0,970
A3-29	0,801	0,831	0,833	0,827	0,863	0,878
A1-84	1,173	1,161	1,254	1,264	1,347	1,362
A1-58	1,243	1,272	1,341	1,391	1,399	1,257
A1-61	1,393	1,425	1,531	1,545	1,527	1,409
A1-74	1,345	1,370	1,459	1,477	1,485	1,510
A6-30	1,993	2,004	2,061	2,047	2,034	2,082
A6-27	1,960	1,908	1,896	1,923	1,978	2,015
A6-34	1,966	1,967	1,954	1,881	1,969	1,980
A6-44	1,297	1,297	1,312	1,350	1,360	1,367

TABLA 7. Resultados MPD (mm) Equipo SCRIM 3.

	Perfilómetro 1			Perfilómetro 2			Perfilómetro 3		
	MPD1	MPD2		MPD1	MPD2		MPD1	MPD2	MPD3
A3-39	0.358	0.347	A3-39	0.401	0.396	A3-39	0.410	0.417	0.424
A3-29	0.424	0.423	A3-29	0.516	0.518	A3-29	0.439	0.436	0.458
A1-84	0.637	0.633	A1-84	0.642	0.648	A1-84	0.622	0.628	0.614
A1-58	0.703	0.716	A1-58	0.673	0.682	A1-58	0.626	0.647	0.620
A1-61	0.822	0.877	A1-61	0.892	0.880	A1-61	0.738	0.753	0.738
A1-74	0.879	0.921	A1-74	0.929	0.944	A1-74	0.912	0.909	0.913
A6-30	1.293	1.293	A6-30	1.340	1.342	A6-30	1.297	1.307	1.309
A6-27	1.183	1.172	A6-27	1.208	1.215	A6-27	1.184	1.167	1.172
A6-34	1.260	1.265	A6-34	1.292	1.306	A6-34	1.266	1.297	1.255
A6-44	1.383	1.426	A6-44	1.470	1.439	A6-44	1.492	1.511	1.545

TABLA 8. Resultados MPD (mm) equipos Perfilómetro Láser.

En la Tabla 8 figuran los datos obtenidos con los Perfilómetros Láser a la velocidad de ensayo de 80 km/h en las dos pasadas realizadas (en el caso del Perfilómetro Láser 3 se efectuó una tercera pasada adicional).

**CORRELACIONES ENTRE PASADAS Y REPETIBILIDAD DE LOS EQUIPOS**

Con el fin de observar si hay variabilidad entre las distintas pasadas realizadas con los diferentes equipos de medida de la MPD, se estudiaron las correlaciones entre las distintas pasadas realizadas por cada equipo en cada tramo. En todos los casos se obtuvo un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> superior a 0,99 entre las dos pasadas realizadas a cada velocidad (el Perfilómetro 2 realizó 3 pasadas, obteniendo también un R<sup>2</sup> superior a 0,99 entre todas ellas), excepto las pasadas efectuadas por el SCRIM 3 a 60 km/h, para las que se obtuvo un valor de 0,97.

Así mismo, se han estudiado las estadísticas de la regresión, obteniendo, de forma general, que la repetibilidad de los equipos es elevada y que es válido hacer la media de las dos pasadas, ya que en un principio, se pueden tomar como dos mediciones independientes.

**INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE MEDIDA EN LOS RESULTADOS DE LA MPD OBTENIDA CON LOS EQUIPOS SCRIM**

Al analizar los datos obtenidos con cada equipo a las diferentes velocidades a las que se realizó el ensayo (40, 50 y 60 km/h), se observaron pequeñas variaciones en el valor de la MPD media en cada tramo.

Para cuantificar estas diferencias se analizaron las correlaciones entre los valores obtenidos a diferentes velocidades, con el fin de estimar si es necesario introducir un factor de corrección de la MPD en función de la velocidad de ensayo. Se ha considerado como referencia los valores de MPD medidos a 50 km/h, por ser la velocidad normalizada de operación del equipo SCRIM. El resultado ha sido que todas las correlaciones presentan un elevado valor para el coeficiente de correlación R<sup>2</sup> y unos valores de los coeficientes “a” y “b” de las rectas de regresión muy próximos a uno y cero, respectivamente, excepto en el caso del SCRIM 3, para el que dichos coeficientes se alejan ligeramente de lo esperado.

A continuación, se realizó un análisis de las distintas regresiones para comprobar si, con un intervalo de confianza

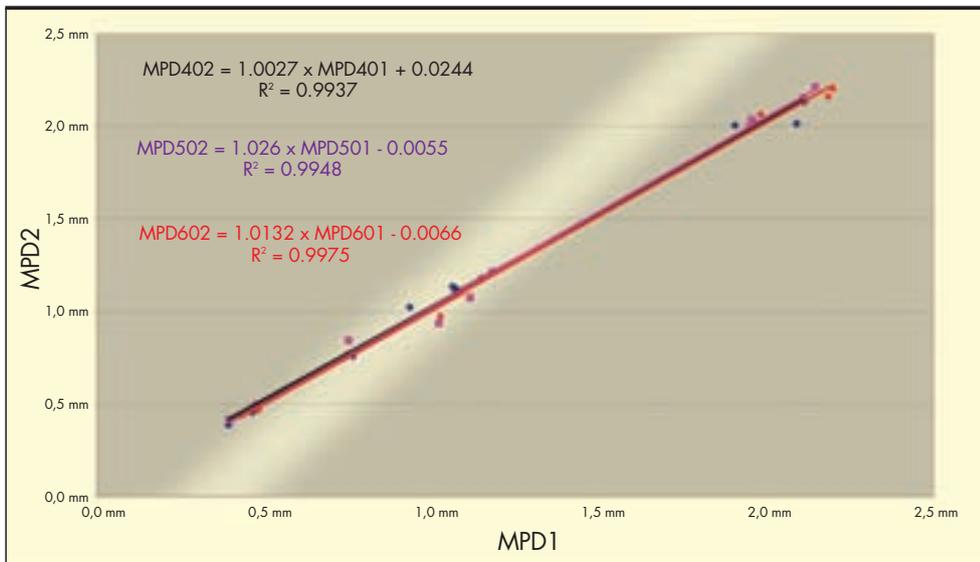


FIGURA 5. Correlación entre pasadas del Equipos SCRIM 1 a 40, 50 y 60 km/h.

CORRELACIÓN DE MEDIDAS DE MACROTEXTURA TOMADAS CON EL MÉTODO VOLUMÉTRICO Y CON DIFERENTES TEXTURÓMETROS LÁSER

Datos originales										
Equipo: Perfilómetro 3			Velocidad: 80 Km/h				3 Pasadas			
Tramo =>	A3-39	A3-29	A1-84	A1-58	A1-61	A1-74	A6-30	A6-27	A6-34	A6-44
C. Rod.	Horm.	Horm.	S-12	D-20	D-20	D-20	PA-12	PA-12	PA-12	M-10
Media	0,417	0,444	0,621	0,634	0,743	0,911	1,304	1,174	1,272	1,516
Desviación	0,042	0,058	0,039	0,056	0,065	0,143	0,063	0,041	0,105	0,079
Inter. Sup. Media	0,430	0,462	0,634	0,651	0,763	0,955	1,324	1,187	1,305	1,540
Inter. Inf. Media	0,404	0,426	0,609	0,616	0,723	0,867	1,285	1,162	1,240	1,491
Intervalo	0,499	0,557	0,698	0,743	0,871	1,190	1,428	1,256	1,479	1,672
95%	0,335	0,331	0,545	0,524	0,615	0,632	1,181	1,093	1,066	1,360
Nº Valores =>	3	2	3	2	2	2	1	3	1	1
Intervalo	0,543	0,617	0,739	0,802	0,939	1,339	1,493	1,299	1,588	1,754
Aberrantes	0,292	0,271	0,504	0,466	0,547	0,484	1,115	1,050	0,956	1,278
Nº Valores =>	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Nº Valores válidos	47	44	46	45	46	45	26	45	46	46
Datos sin valores aberrantes										
Equipo: Perfilómetro 3			Velocidad: 80 Km/h				3 Pasadas			
Tramo =>	A3-39	A3-29	A1-84	A1-58	A1-61	A1-74	A6-30	A6-27	A6-34	A6-44
C. Rod.	Horm.	Horm.	S-12	D-20	D-20	D-20	PA-12	PA-12	PA-12	M-10
Media	0,408	0,444	0,621	0,634	0,743	0,911	1,304	1,174	1,272	1,522
Desviación	0,021	0,058	0,039	0,056	0,065	0,143	0,063	0,041	0,105	0,067
Inter. Sup. Media	0,415	0,462	0,634	0,651	0,763	0,955	1,324	1,187	1,305	1,543
Inter. Inf. Media	0,402	0,426	0,609	0,616	0,723	0,867	1,285	1,162	1,240	1,501
Intervalo	0,448	0,557	0,698	0,743	0,871	1,190	1,428	1,256	1,479	1,654
95%	0,368	0,331	0,545	0,524	0,615	0,632	1,181	1,093	1,066	1,390
Nº Valores =>	1	2	3	2	2	2	1	3	1	2
Intervalo	0,470	0,617	0,739	0,802	0,939	1,339	1,493	1,299	1,588	1,725
Aberrantes	0,347	0,271	0,504	0,466	0,547	0,484	1,115	1,050	0,956	1,320
Nº Valores =>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº Valores válidos	44	44	46	45	46	45	26	45	46	45
Test de Kolmogorov tras la eliminación de valores aberrantes										
Equipo: Perfilómetro 3			Velocidad: 80 Km/h				3 Pasadas			
Tramo	A3-39	A3-29	A1-84	A1-58	A1-61	A1-74	A6-30	A6-27	A6-34	A6-44
Intervalos	[ Frec. Relativa Acumulada Esperada -Frec.Relativa Acumulada Observada ]									
(-∞, -3.8)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
(-3.8, -3.4)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
(-3.4, -3)	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
(-3, -2.6)	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
(-2.6, -2.2)	0,0139	0,0139	0,0139	0,0083	0,0139	0,0139	0,0139	0,0305	0,0139	0,0305
(-2.2, -1.8)	0,0132	0,0359	0,0359	0,0085	0,0359	0,0307	0,0359	0,0085	0,0142	0,0085
(-1.8, -1.4)	0,0102	0,0353	0,0373	0,0526	0,0808	0,0304	0,0808	0,0141	0,0373	0,0526
(-1.4, -1)	0,0686	0,0223	0,0065	0,0031	0,0153	0,0031	0,0253	0,0253	0,0500	0,0031
(-1, -0.6)	0,0439	0,0439	0,0953	0,0298	0,0736	0,0743	0,0334	0,0146	0,0301	0,0520
(-0.6, -0.2)	0,0344	0,0565	0,0575	0,0015	0,0575	0,0015	0,1177	0,0652	0,1010	0,0652
(-0.2, 0.2)	0,0338	0,0344	0,0294	0,0459	0,0947	0,0430	0,1130	0,0237	0,1381	0,0459
(0.2, 0.6)	0,0243	0,0212	0,0134	0,0520	0,0134	0,0146	0,0050	0,0298	0,0134	0,0298
(0.6, 1)	0,0232	0,0004	0,0500	0,0413	0,0587	0,0413	0,0721	0,0031	0,0805	0,0253
(1, 1.4)	0,0102	0,0102	0,0062	0,0141	0,0279	0,0141	0,0346	0,0081	0,0714	0,0081
(1.4, 1.8)	0,0132	0,0095	0,0293	0,0137	0,0075	0,0137	0,0025	0,0137	0,0075	0,0137
(1.8, 2.2)	0,0139	0,0088	0,0296	0,0139	0,0296	0,0139	0,0139	0,0083	0,0139	0,0139
(2.2, 2.6)	0,0047	0,0181	0,0171	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
(2.6, 3)	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
(3, 3.4)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
(3.4, 3.8)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
(3.8, +∞)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DN=	0,0686	0,0565	0,0953	0,0526	0,0947	0,0743	0,1177	0,0652	0,1381	0,0652
DN *N(1/2)	0,4552	0,3750	0,6464	0,3527	0,6420	0,4981	0,6003	0,4373	0,9369	0,4373
H0=	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto	Acepto
Dα=	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36

TABLA 9. Resultados análisis estadístico Equipo Perfilómetro 3.

del 95%, se puede afirmar que las correlaciones se ajustan de la manera siguiente:

$$\text{MPD}(40) = \text{MPD}(50) \quad \text{y} \quad \text{MPD}(60) = \text{MPD}(50)$$

La conclusión fue que dentro del intervalo de velocidades estudiado, la variación de la textura medida con equipos SCRIM en función de la velocidad, no resulta relevante y por ello, no parece razonable desarrollar un modelo para corregir la MPD en función de la velocidad.

Por este motivo, se tomó como valor de la medida de la MPD para cada equipo en cada tramo el resultado de realizar la media aritmética de las todas las pasadas a todas las velocidades.

#### INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE MEDIDA EN LOS RESULTADOS DE LA MPD MEDIDA CON EL EQUIPO PERFILÓMETRO LÁSER DEL CEDEX

Como se ha indicado, de forma adicional se tomaron datos de textura con el perfilómetro del CEDEX a 40 km/h en algunos de los tramos, con el objetivo de llevar a cabo un pequeño estudio de la influencia de la velocidad en las medidas de la textura efectuadas con los equipos de tipo Perfilómetro Láser.

La correlación entre los valores de la MPD tomada a 80 km/h y los de la MPD obtenida a 40 km/h para el perfilómetro del CEDEX, dio como resultado un elevado valor para el coeficiente de correlación  $R^2$  y unos valores de los coeficientes "a" y "b" de las rectas de regresión muy próximos a uno y cero, respectivamente. Igual que en el caso de los equipos SCRIM, se puede concluir en base al estudio realizado, que en el rango de velocidades analizado, ésta no parece influir en el valor de la MPD medida, por lo cual es innecesario corregir dicho valor en función de la velocidad de auscultación.

Cabe indicar que los datos de textura recogidos con el perfilómetro del CEDEX a 40 km/h se consideraron adicionales a las medidas en sí, por lo que a pesar de la buena correlación, no se tuvieron en cuenta a la hora de determinar el valor medio de MPD medido con el perfilómetro del CEDEX.

#### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Al igual que se hizo con los valores de PMT medidos por el método de la mancha de arena, se realizaron una serie de

comprobaciones que permitieran estimar si los datos obtenidos con los distintos equipos por medio de métodos perfilométricos se pueden asimilar a muestras estadísticas aleatorias que proceden de poblaciones normalizadas.

Se calcularon los intervalos para considerar los valores como aberrantes, es decir, los valores que están alejados más de tres desviaciones típicas del valor medio del tramo y a diferencia del resultado obtenido en las medidas con el círculo de arena, se encontraron varios valores fuera del citado intervalo. Los valores aberrantes fueron retirados del cálculo. En cualquier caso, las diferencias entre los resultados obtenidos, incluyendo o no los valores aberrantes, fueron muy pequeñas.

Para cada uno de los equipos participantes, se elaboró una tabla como la que se muestra a continuación, en la que se resume el análisis de los datos del Perfilómetro 3 (Tabla 9).

El resultado de realizar el test de Kolmogorov sobre los datos obtenidos, fue en todos los casos que la hipótesis de partida es válida, es decir que los residuos de los datos normalizados siguen una distribución Normal  $N(0,1)$ .

### 3.3. RESUMEN DE LOS ENSAYOS

Los resultados finales obtenidos por cada equipo, en cada tramo, incluido el ensayo del círculo de arena, son los mostrados en la Tabla 10 y representados en la Figura 6.

A la vista de los resultados y como una primera consideración, se puede observar que:

- Con los tres perfilómetros y con el equipo SCRIM 2 se obtienen resultados similares.
- Con los equipos SCRIM 1 y 3, se obtienen datos dispares.
- En todos los casos, los resultados obtenidos no parecen ser directamente comparables con las medidas del círculo de arena, que en la parte baja de la escala (valores inferiores a 1 mm) se asemejan a los valores obtenidos con los perfilómetros y el SCRIM 2 y en la parte alta (valores superiores a 1mm) se asemejan más a los datos obtenidos con el SCRIM 3, estando los resultados obtenidos con el equipo SCRIM 1 en la parte media de los dos grupos.

Equipo=>	Perfilómetros ( MPD mm )			SCRIM ( MPD mm )			( PMT mm )
	1	2	3	1	2	3	Circulo Arena
A3-39	0,336	0,382	0,408	0,471	0,547	0,905	0,273
A3-29	0,424	0,517	0,444	0,400	0,525	0,822	0,288
A1-84	0,635	0,645	0,621	0,987	0,772	1,331	0,420
A1-58	0,710	0,677	0,634	0,766	0,704	1,257	0,502
A1-61	0,843	0,886	0,743	1,116	0,936	1,483	0,623
A1-74	0,900	0,937	0,911	1,151	0,953	1,435	0,773
A6-30	1,293	1,341	1,304	2,152	1,270	2,037	1,708
A6-27	1,178	1,211	1,174	2,005	1,166	1,954	1,727
A6-34	1,262	1,299	1,272	1,971	1,244	1,960	1,720
A6-44	1,405	1,455	1,522	2,143	1,330	2,111	2,404

TABLA 10. Resumen de los resultados obtenidos.

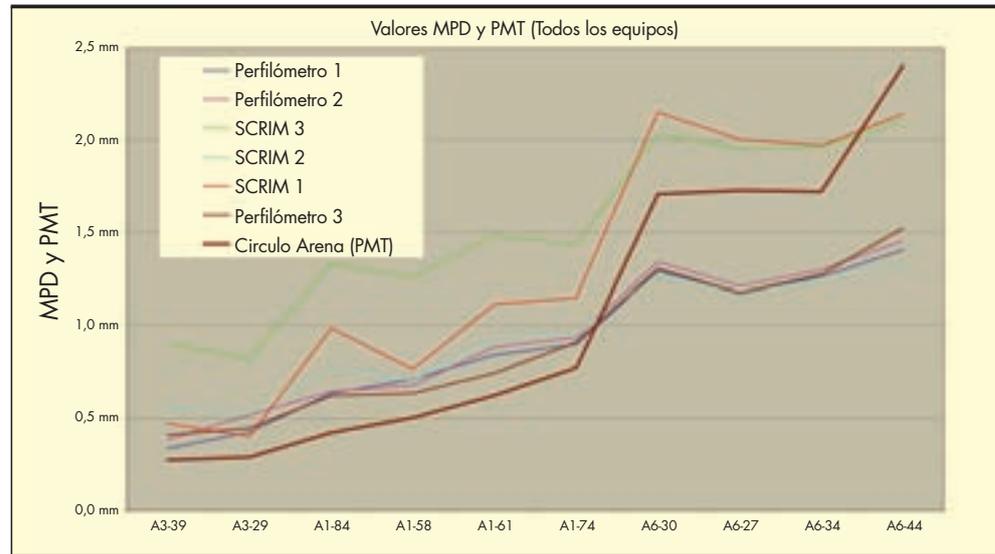


FIGURA 6. Resumen de los resultados obtenidos.

En conclusión, resulta evidente que no todos los equipos utilizan el mismo procesado o los mismos algoritmos de cálculo para la obtención de la MPD. No obstante, los valores obtenidos con los distintos equipos resultan ser muy consistentes, ya que las repetibilidades obtenidas son muy elevadas.

Hay que tener en cuenta que todas estas conclusiones son válidas para los valores medios de los tramos. Un intento de realizar correlaciones entre pasadas punto a punto no podrá lograr nunca estos niveles de precisión, ya que la comparación

dato a dato de dos muestras de una única población presentará estadísticamente una pésima correlación, debido a la lógica variabilidad de los datos individuales.

#### 4. CORRELACIONES

##### 4.1. CORRELACIONES ENTRE EQUIPOS

Las correlaciones obtenidas son bastante fuertes, teniendo todas un coeficiente de determinación  $R^2$  superior a 0,94,

Resumen de correlaciones entre equipos participantes			
Ecuaciones de correlación lineal			
	Perfilómetro 1 (x)	Perfilómetro 2 (x)	Perfilómetro 3 (x)
Perfilómetro 1 (y)	-	$Y = 0,994X - 0,031$	$Y = 0,946X + 0,044$
Perfilómetro 2 (y)	$Y = 0,999X + 0,038$	-	$Y = 0,951X + 0,076$
Perfilómetro 3 (y)	$Y = 1,031X - 0,023$	$Y = 1,032X - 0,061$	-
SCRIM 1 (y)	$Y = 1,8X - 0,301$	$Y = 1,796X - 0,363$	$Y = 1,72X - 0,237$
SCRIM 2 (y)	$Y = 0,793X + 0,232$	$Y = 0,791X + 0,205$	$Y = 0,753X + 0,265$
SCRIM 3 (y)	$Y = 1,228X + 0,426$	$Y = 1,216X + 0,393$	$Y = 1,158X + 0,483$
Valores del coeficiente de correlación $R^2$			
Perfilómetro 1 (y)		$R^2 = 0,993$	$R^2 = 0,975$
Perfilómetro 2 (y)	$R^2 = 0,993$		$R^2 = 0,981$
Perfilómetro 3 (y)	$R^2 = 0,975$	$R^2 = 0,981$	
SCRIM 1 (y)	$R^2 = 0,955$	$R^2 = 0,955$	$R^2 = 0,951$
SCRIM 2 (y)	$R^2 = 0,981$	$R^2 = 0,981$	$R^2 = 0,964$
SCRIM 3 (y)	$R^2 = 0,972$	$R^2 = 0,956$	$R^2 = 0,942$
Errores típicos medios de la regresión'			
Perfilómetro 1 (y)		$\pm 0,034$ mm	$\pm 0,063$ mm
Perfilómetro 2 (y)	$\pm 0,034$ mm		$\pm 0,055$ mm
Perfilómetro 3 (y)	$\pm 0,065$ mm	$\pm 0,057$ mm	
SCRIM 1 (y)	$\pm 0,155$ mm	$\pm 0,156$ mm	$\pm 0,163$ mm
SCRIM 2 (y)	$\pm 0,044$ mm	$\pm 0,044$ mm	$\pm 0,061$ mm
SCRIM 3 (y)	$\pm 0,084$ mm	$\pm 0,105$ mm	$\pm 0,119$ mm

TABLA 11. Correlaciones lineales de los perfilómetros.

Resumen de correlaciones entre equipos participantes			
Ecuaciones de correlación lineal			
	SCRIM 1 (x)	SCRIM 2 (x)	SCRIM 3 (x)
Perfilómetro 1 (y)	$Y = 0,531X + 0,2$	$Y = 1,237X - 0,27$	$Y = 0,791X - 0,311$
Perfilómetro 2 (y)	$Y = 0,532X + 0,235$	$Y = 1,24X - 0,236$	$Y = 0,786X - 0,267$
Perfilómetro 3 (y)	$Y = 0,553X + 0,176$	$Y = 1,281X - 0,306$	$Y = 0,813X - 0,341$
SCRIM 1 (y)	-	$Y = 2,268X - 0,826$	$Y = 1,465X - 0,924$
SCRIM 2 (y)		-	
SCRIM 3 (y)	$Y = 0,671X + 0,647$	$Y = 1,541X + 0,073$	-
Valores del coeficiente de correlación R <sup>2</sup>			
Perfilómetro 1 (y)	R <sup>2</sup> = 0,955	R <sup>2</sup> = 0,981	R <sup>2</sup> = 0,972
Perfilómetro 2 (y)	R <sup>2</sup> = 0,955	R <sup>2</sup> = 0,981	R <sup>2</sup> = 0,956
Perfilómetro 3 (y)	R <sup>2</sup> = 0,951	R <sup>2</sup> = 0,964	R <sup>2</sup> = 0,942
SCRIM 1 (y)		R <sup>2</sup> = 0,972	R <sup>2</sup> = 0,982
SCRIM 2 (y)	R <sup>2</sup> = 0,972		R <sup>2</sup> = 0,98
SCRIM 3 (y)	R <sup>2</sup> = 0,982	R <sup>2</sup> = 0,98	
Errores típicos medios de la regresión'			
Perfilómetro 1 (y)	± 0,084 mm	± 0,055 mm	± 0,067 mm
Perfilómetro 2 (y)	± 0,085 mm	± 0,056 mm	± 0,084 mm
Perfilómetro 3 (y)	± 0,092 mm	± 0,079 mm	± 0,1 mm
SCRIM 1 (y)		± 0,123 mm	± 0,097 mm
SCRIM 2 (y)	± 0,054 mm		± 0,045 mm
SCRIM 3 (y)	± 0,066 mm	± 0,07 mm	

TABLA 12. Correlaciones lineales de los equipos SCRIM.

aunque hay diferencias medias relativamente significativas, ya que los errores medios de la correlación oscilan entre 0,034 mm y 0,163 mm. El resumen de todas las correlaciones entre los diferentes equipos se recogen en las Tablas 11 y 12.

Estos resultados permiten afirmar que en general los valores de la MPD son fácilmente reproducibles y los equipos pueden ser correlacionados unos con otros sin demasiados problemas. En cambio, los coeficientes de las rectas de correlación presentan una gran disparidad y se podrían establecer dos grupos claramente diferenciados: los Perfilómetros Láser y los equipos SCRIM.

- Los Perfilómetros Láser, con elevadísimos coeficientes de correlación y rectas de regresión con pendientes prácticamente iguales a la unidad y coeficientes de interceptación muy pequeños. Se puede afirmar que todos proporcionan unas medidas de la MPD similares, sin

ser necesario utilizar ecuaciones de correlación entre unos y otros.

- Los equipos SCRIM, que también presentan elevados coeficientes de correlación pero que en cambio presentan valores para las rectas de regresión francamente dispares, siendo necesario por tanto realizar la regresión para compararlos, tanto entre ellos como con los perfilómetros láser.

#### 4.2. CORRELACIONES LINEALES ENTRE MPD Y PMT

En el resumen de la Tabla 13, se observa que los coeficientes de ninguna de las ecuaciones de correlación entre la MPD medida por los distintos equipos y la PMT obtenida por el método del círculo de arena son similares a los que aparecen en la Ecuación (1), (a)=0,8 y (b)=0,2. Igualmente, cabe indicar que los errores típicos que se obtienen son relativamente elevados (entre 0,17 mm y 0,28 mm).

	Perfilómetros ( MPD mm )			SCRIM ( MPD mm )		
	1	2	3	1	2	3
R <sup>2</sup>	0.9018	0.9168	0.9588	0.9100	0.8844	0.8807
Coefficiente (a)	1.9412	1.9531	1.9168	1.0588	2.4016	1.5394
Coefficiente (b)	-0.7003	-0.7821	-0.6880	-0.3497	-1.2247	-1.3106
Error Típico	± 0,26 mm	± 0,24 mm	± 0,17 mm	± 0,24 mm	± 0,28 mm	± 0,28 mm

TABLA 13. Correlaciones lineales entre la MPD y la PMT.

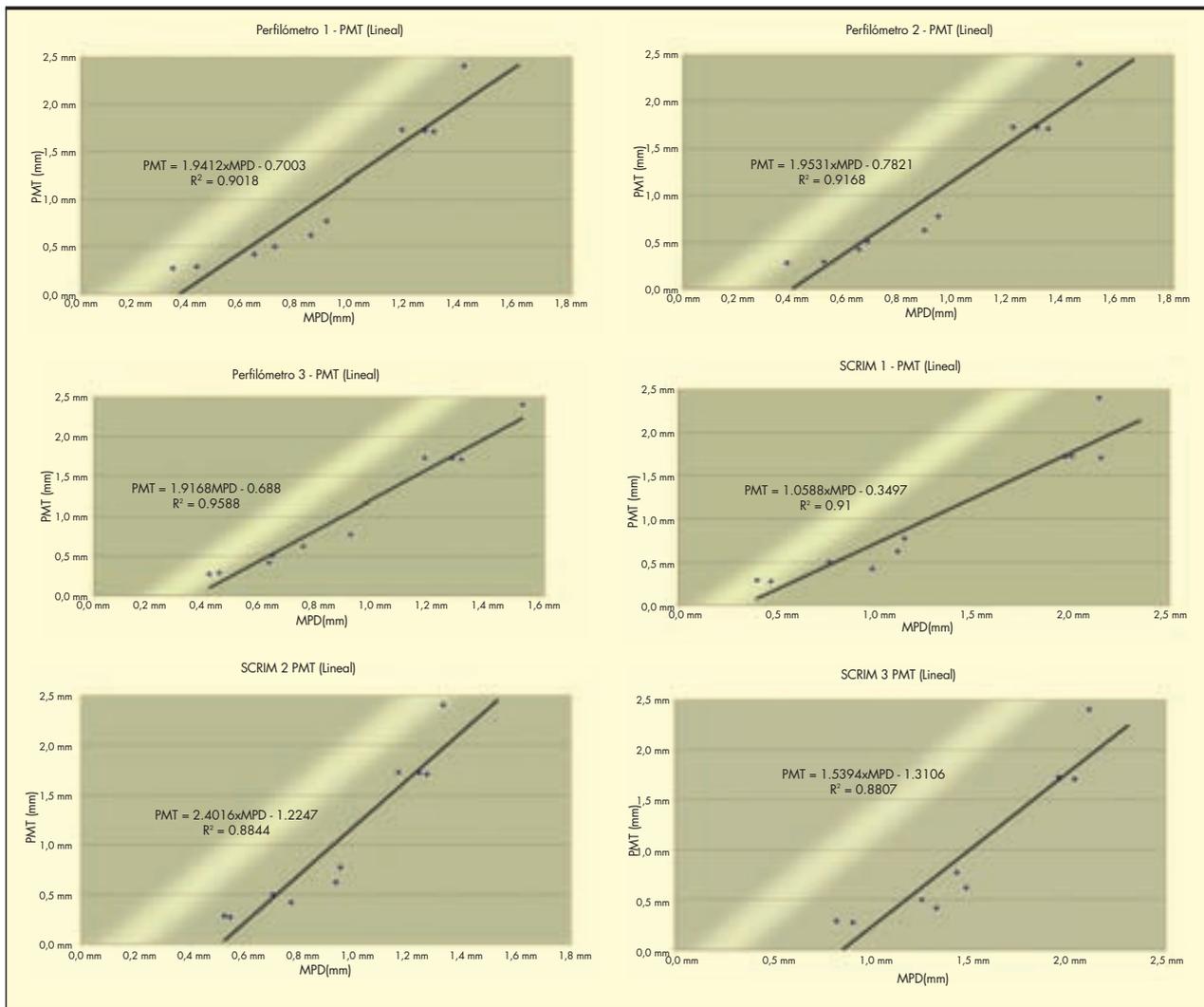


FIGURA 7. Gráficas de las correlaciones lineales obtenidas entre la MPD medida con distintos equipos y la PMT.

A pesar de que los coeficientes de correlación no son excesivamente malos, hay que hacer notar que las nubes de puntos que relacionan la MPD con la PMT no se ajustan convenientemente a rectas de regresión lineales, tal y como se muestra en las gráficas en las que se han representado las correlaciones (Figura 7).

Si se emplean las ecuaciones lineales mostradas en los gráficos anteriores, se obtendría para cada equipo los valores de la ETD estimada que se muestran en la Tabla 14. En ella se recogen valores incluso negativos, siendo éste otro indicativo de que las correlaciones lineales no son las más adecuadas para estimar la ETD en función de la MPD. Así mismo, en la Figura 8 se han representado dichos valores y en ella se aprecian los errores que se producen al estimar la profundidad de textura con las ecuaciones de correlación lineales obtenidas.

#### 4.3. CORRELACIONES EXPONENCIALES ENTRE MPD Y PMT

A la vista de los resultados obtenidos al estudiar las correlaciones lineales entre la MPD y la PMT, se estudiaron otro tipo de curvas de regresión. Finalmente, se decidió emplear regresiones exponenciales, que aparentemente son las que mejor se

ajustan a las nubes de puntos, tal y como se justifica a continuación.

La expresión general de la regresión exponencial es la que se muestra en la siguiente ecuación:

$$PMT = ETD = a \times e^{b \times MPD} \quad (3)$$

Los resultados obtenidos se muestran en los gráficos de la Figura 9, en los que se puede observar en todos los casos que las nubes de puntos se aproximan de manera más eficiente al modelo exponencial que en el caso de las correlaciones lineales expuestas en el apartado anterior. En la Tabla 15 se puede ver un resumen de los resultados, donde se aprecia el incremento en todos los casos del coeficiente de determinación  $R^2$  con respecto al que se obtenía en las correlaciones lineales. En el caso de los perfilómetros,  $R^2$  está por encima del 0,982 y en el caso de los equipos SCRIM, supera el valor de 0,966. Por otro lado, el valor de los errores típicos desciende en todos los casos, excepto en el Perfilómetro 3, para el que se mantiene (en este caso, los errores oscilan entre 0,12 y 0,19 mm).

Los valores obtenidos para la estimación de la textura ETD (Estimated Texture Deep) al realizar la correlación expo-

Equipo=>	Estimaciones lineales						
	Perfilómetros ( ETD mm )			SCRIM ( ETD mm )			( PMT mm )
	1	2	3	1	2	3	Circulo Arena
A3-39	-0,048	-0,036	0,094	0,149	0,088	0,083	0,273
A3-29	0,122	0,227	0,164	0,074	0,037	-0,045	0,288
A1-84	0,532	0,477	0,503	0,696	0,629	0,739	0,420
A1-58	0,678	0,541	0,527	0,462	0,466	0,625	0,502
A1-61	0,937	0,948	0,736	0,832	1,023	0,973	0,623
A1-74	1,047	1,047	1,058	0,869	1,063	0,898	0,773
A6-30	1,809	1,836	1,812	1,928	1,826	1,825	1,708
A6-27	1,586	1,584	1,563	1,773	1,575	1,697	1,727
A6-34	1,750	1,756	1,751	1,737	1,762	1,707	1,720
A6-44	2,026	2,059	2,230	1,919	1,970	1,938	2,404

TABLA 14. Valores de la ETD (mm) para los distintos equipos con las estimaciones lineales obtenidas.

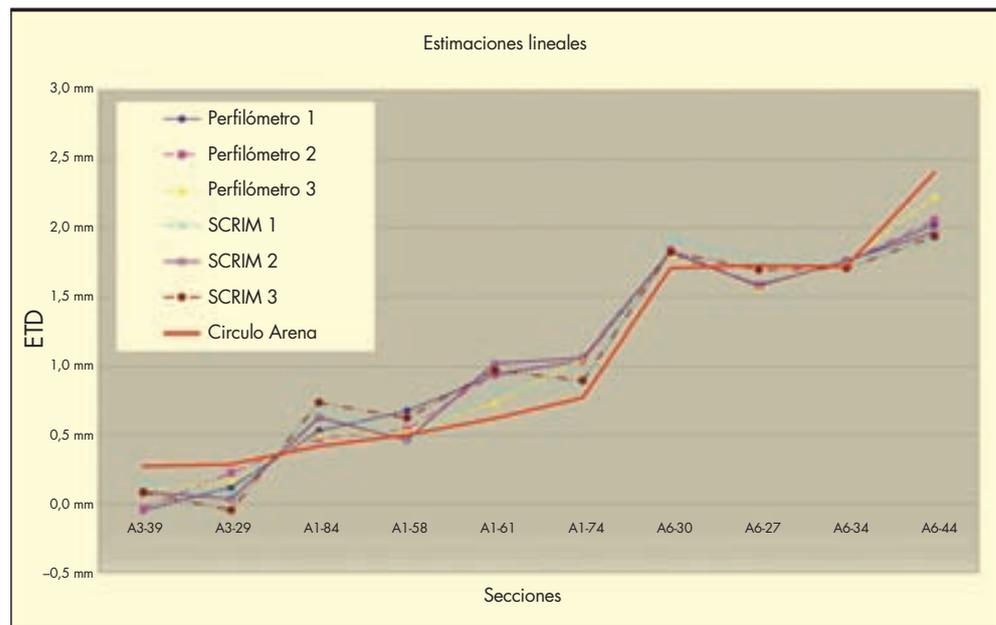


FIGURA 8. Valores de la ETD (mm) para los distintos equipos con las estimaciones lineales obtenidas.

	Perfilómetros ( MPD mm )			SCRIM ( MPD mm )		
	1	2	3	1	2	3
R <sup>2</sup>	0,9860	0,9830	0,9820	0,9670	0,9660	0,9660
Coefficiente (a)	0,1168	0,1089	0,1259	0,1755	0,0650	0,0595
Coefficiente (b)	2,1305	2,1227	2,0358	1,1453	2,6395	1,6924
Error Típico	± 0,12 mm	± 0,13 mm	± 0,17 mm	± 0,19 mm	± 0,15 mm	± 0,13 mm

TABLA 15. Correlaciones exponenciales entre la MPD y la PMT.

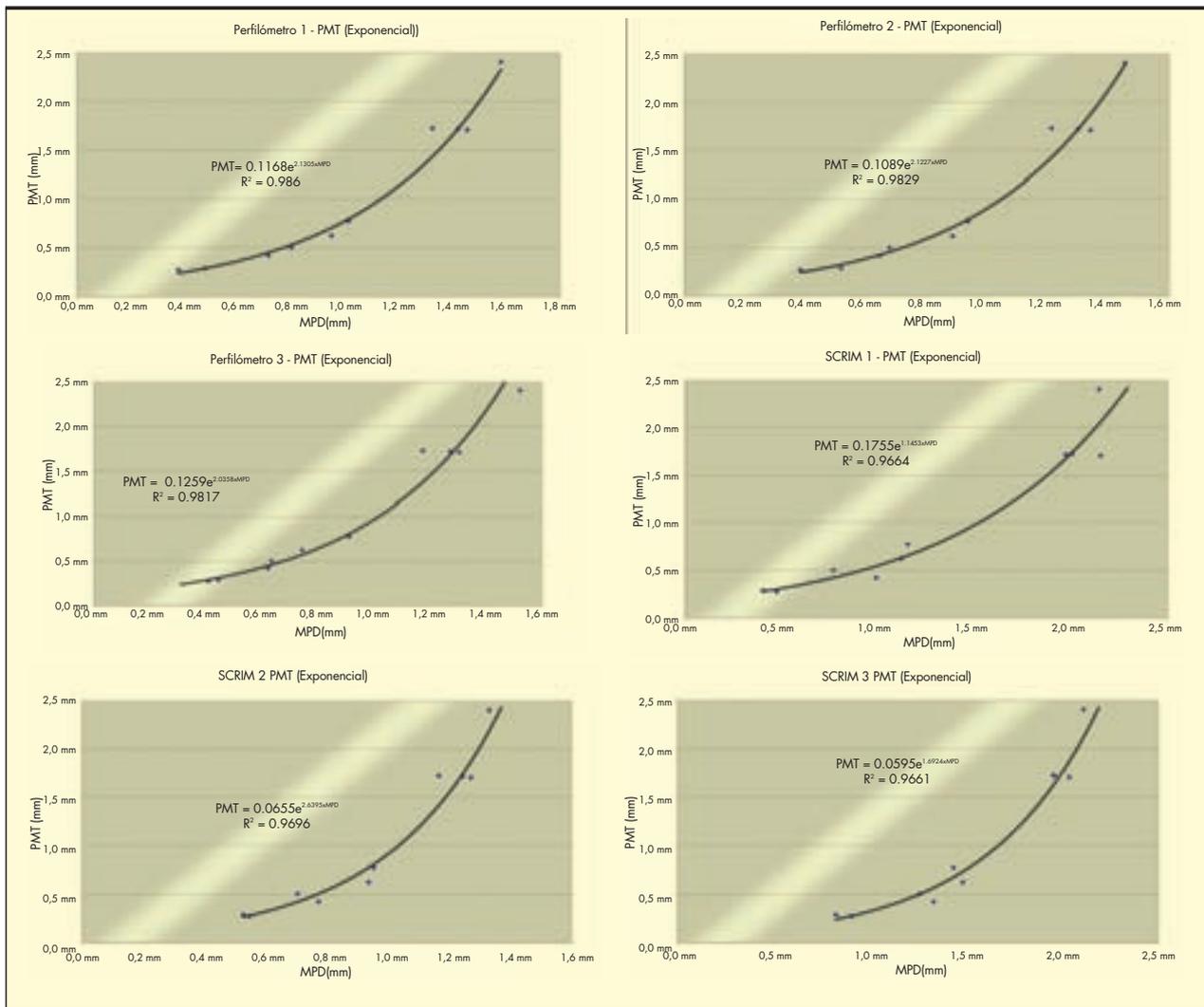


FIGURA 9. Gráficas de las correlaciones exponenciales obtenidas entre la MPD medida con distintos equipos y la PMT.

nencial (Tabla 16 y Figura 10) ajustan sustancialmente mejor a la PMT que los obtenidos con las correlaciones lineales.

No obstante, en las secciones con valores de PMT superiores a 1 mm se observan unas dispersiones más elevadas que en aquellas con valores inferiores al citado valor, lo que indica que los texturómetros láser tienen dificultades para medir correctamente las texturas más abiertas, probablemente por la pérdida de señal que se produce en las superficies porosas o con tamaños de huecos más grandes.

## 5. CONCLUSIONES

A lo largo del año 2007 y 2008 el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX llevó a cabo una serie de medidas de macrotextura por medio del método volumétrico (UNE-EN 13036-1:2010) y por medio de métodos perfilométricos (UNE-EN ISO 13473-1:2006), para tratar de determinar la relación entre los parámetros PMT (Profundidad Media de Textura) y la MPD (Profundidad Media del Perfil), que son los que se obtienen respectivamente con los métodos citados.

Las medidas de macrotextura por medio de métodos perfilométricos se han tomado con 5 texturómetros láser diferen-

tes (embarcados en distintos vehículos, tipo SCRIM y tipo Perfilómetro Láser), realizando en todos los casos un mínimo de dos pasadas en cada tramo medido, a una o varias velocidades (40, 50 y 60 km/h en los equipos SCRIM y 80 km/h en los Perfilómetros Láser). Los tramos de carretera que se seleccionaron para realizar las medidas estaban situados en las provincias de Madrid y Toledo, y todos ellos cumplían el requisito de ser homogéneos estadísticamente con respecto a la variable medida (MPD en mm).

Los resultados del estudio indican que la mejor correlación entre las variables PMT y MPD no es de tipo lineal, como la propuesta en la norma UNE-EN ISO 13473-1:2006 (Ecuación (2)), sino que es de tipo exponencial:

1. Los resultados del coeficiente de determinación al emplear correlaciones de tipo lineal están comprendidos entre 0,881 y 0,917, y solo para uno de los equipos asciende a 0,959. Además, se observa en los gráficos que las nubes de puntos no se ajustan correctamente a las rectas de correlación.
2. Los coeficientes de las ecuaciones de correlación de tipo lineal obtenidas para los distintos texturómetros láser

Equipo=>	Estimaciones exponenciales						
	Perfilómetros ( ETD mm )			SCRIM ( ETD mm )			( PMT mm )
	1	2	3	1	2	3	Circulo Arena
A3-39	0,239	0,245	0,289	0,301	0,275	0,275	0,273
A3-29	0,288	0,326	0,311	0,278	0,260	0,239	0,288
A1-84	0,452	0,428	0,446	0,544	0,499	0,566	0,420
A1-58	0,530	0,459	0,457	0,422	0,417	0,500	0,502
A1-61	0,704	0,714	0,571	0,630	0,769	0,732	0,623
A1-74	0,795	0,795	0,805	0,656	0,803	0,675	0,773
A6-30	1,835	1,875	1,791	2,063	1,857	1,869	1,708
A6-27	1,436	1,425	1,375	1,743	1,410	1,623	1,727
A6-34	1,719	1,717	1,679	1,677	1,731	1,642	1,720
A6-44	2,329	2,388	2,792	2,042	2,177	2,117	2,404

TABLA 16. Valores de la ETD (mm) para los distintos equipos con las estimaciones exponenciales obtenidas.

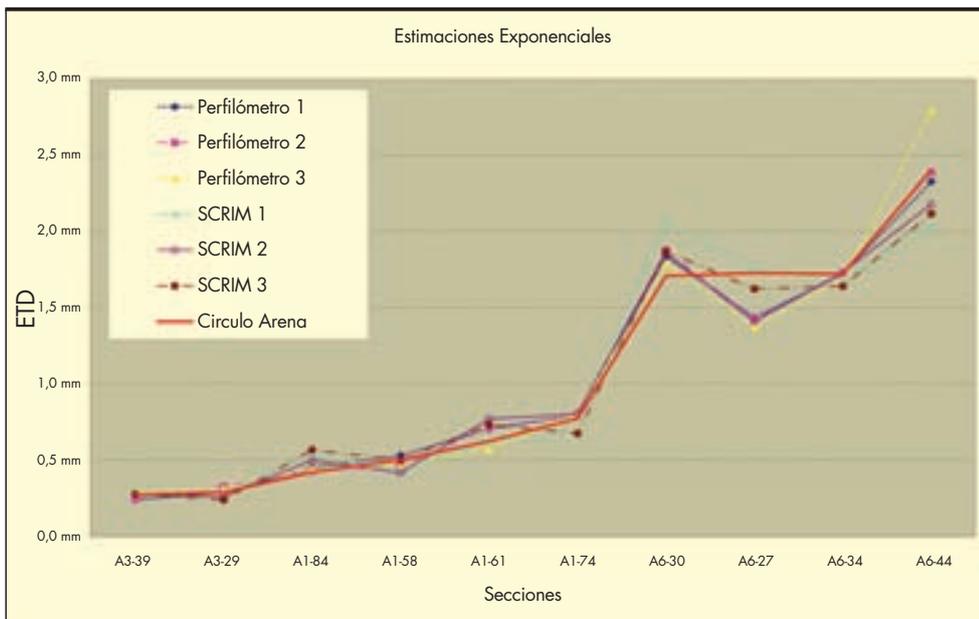


FIGURA 10. Valores de la ETD (mm) para los distintos equipos con las estimaciones exponenciales obtenidas.

difieren de los que aparecen en la Ecuación (2). Así mismo, los errores típicos que se obtienen son más elevados que en el caso de correlaciones exponenciales (entre 0,17 mm y 0,28 mm).

- Los resultados del coeficiente de determinación al emplear correlaciones de tipo exponencial son superiores a 0,982 en el caso de los perfilómetros, y están por encima de 0,966 en el caso de los equipos SCRIM. Asimismo se aprecia un claro ajuste de las nubes de puntos con el modelo exponencial estudiado.
- Los errores típicos en las correlaciones de tipo exponencial descienden con respecto a los obtenidos en las de tipo lineal (en este caso, oscilan entre 0,12 y 0,19 mm).

Por todo ello, se considera que la ecuación de correlación que se propone en la norma UNE-EN ISO 13473-1:2006 debería ser revisada, puesto que en base a los resultados analizados, se encuentra que el mejor ajuste debería ser de tipo exponencial y no lineal.

Es importante destacar que a partir de valores de PMT superiores a 1 mm se observan mayores dispersiones entre los resultados que se obtienen con el método volumétrico y con los perfilométricos, que para valores inferiores al citado valor, lo que indica que los texturómetros láser tienen dificultades para medir correctamente las texturas más abiertas, debido probablemente a la pérdida de señal que se produce en las superficies porosas o con tamaños de huecos más grandes.

Por otro lado, se han correlacionado todos los equipos de medida de la textura entre sí, y los resultados obtenidos permiten afirmar que, en general, los valores de la MPD son fácilmente reproducibles y los equipos pueden ser correlacionados unos con otros sin demasiados problemas. Los Perfilómetros Láser presentan elevados coeficientes de correlación y las rectas de regresión tienen pendientes prácticamente iguales a la unidad y coeficientes de interceptación muy pequeños, por lo que no sería necesario utilizar ecuaciones de correlación entre unos y otros. Por otro lado, los equipos SCRIM también presentan elevados coeficientes de correlación, pero en cambio los valores para las rectas de regresión son francamente dispares, siendo necesario por tanto realizar la regresión para compararlos, tanto entre ellos como con los perfilómetros láser.

Adicionalmente, el estudio ha permitido obtener otras conclusiones de gran interés que se recogen a continuación:

1. La repetibilidad de los equipos es muy alta.
2. Dentro del intervalo de velocidades estudiado (40, 50 y 60 km/h para los equipos SCRIM y 40 y 80 km/h para los Perfilómetros Láser), la variación de la textura medida en función de la velocidad no resulta relevante y por ello, no parece razonable desarrollar un modelo para corregir la MPD en función de la velocidad.

Por último, se quiere destacar la importancia de diseñar correctamente los estudios de correlación entre variables, lo que pasa por asegurar la recogida de una gran cantidad de datos, garantizar la homogeneidad de los tramos de ensayo y conseguir que el rango de los parámetros sea suficientemente amplio. De otra forma, los intentos de correlacionar valores de PMT y MPD, basados en la recogida de un limitado número de muestras en pequeños tramos y sin realizar estudios de la homogeneidad de las variables, pueden dar lugar a graves errores de interpretación. La gran dispersión que, de manera general, se encuentra para los valores de la PMT hace que sea fundamental realizar una detallada selección de los tramos de ensayo, junto con la toma de un elevado número de muestras, y su posterior tratamiento estadístico, que asegure que el valor obtenido es representativo de los tramos de carretera seleccionados. De lo contrario, la variabilidad del valor

medio, que se deriva de muestras de escaso tamaño, enmascarará los resultados y restará validez a los resultados.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General Técnica de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento por el apoyo prestado para la realización del estudio. Así mismo, agradecen a las empresas AEPO (actualmente ACCIONA Ingeniería), EUROCONSULT y GEOCISA por su colaboración para la obtención de los datos de macrotextura en los que se basa este estudio. Igualmente, agradecen a todos los compañeros del Área de Construcción y Medio Ambiente del Centro de Estudios del Transporte la ayuda prestada para la realización del presente artículo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

UNE 41201 IN: 2010 "Características superficiales de carreteras y aeropuertos. Procedimiento para determinar la resistencia al deslizamiento de la superficie de un pavimento a través de la medición del coeficiente de rozamiento transversal (CRTS): SCRIM". AENOR. Madrid.

UNE-EN 13036-1:2002 "Medición de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método del círculo de arena". AENOR. Madrid.

UNE-EN 13036-1:2010 "Medición de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método del círculo de arena". AENOR. Madrid.

UNE-EN ISO 13473-1:2006 "Caracterización de la textura de los pavimentos mediante la medida de perfiles. Parte 1: Determinación de la profundidad media del perfil". AENOR. Madrid.

Yanguas, S (2008). "Nuevo método para el tratamiento y análisis de datos de auscultación de carreteras". Ingeniería Civil, N° 150 (pp. 23-33). Madrid.

Yanguas, S., González, J., Esteban, M. (2008). "Análisis de la correlación entre datos de textura tomados con equipos SCRIM y Perfilómetros Láser con los resultados obtenidos mediante el método del círculo de arena". CEDEX. Madrid.

LAS CARRETERAS HECHAS  
CON BETUNES **ELASTER** AÚN ESTARÁN AHÍ  
CUANDO YA NO SEAN NECESARIAS.



PROAS PRESENTA **ELASTER**, SU NUEVA GAMA DE  
BETUNES MODIFICADOS CON POLÍMERO.

Tecnología punta aplicada al Betún para que tus carreteras  
sean más seguras, ecológicas y longevas.

[www.proas.es](http://www.proas.es)

**PROAS**

Innovando para ti



**SALÓN INTERNACIONAL  
DE LA SEGURIDAD VIAL  
Y EL EQUIPAMIENTO  
PARA CARRETERAS**

15 - 18  
**OCTUBRE  
2013**  
MADRID-ESPAÑA

ORGANIZA



**IFEMA  
Feria de  
Madrid**

**SEGURIDAD**



**INFRAESTRUCTURAS**



**SISTEMAS  
INTELIGENTES DE  
TRANSPORTE**



**APARCAMIENTO**



**SOSTENIBILIDAD**



# TRAFIC2013

PROMUEVEN



COLABORAN



[www.trafic.ifema.es](http://www.trafic.ifema.es)

**LINEA IFEMA**

LLAMADAS DESDE ESPAÑA  
INFOIFEMA 902 22 15 15  
LLAMADAS INTERNACIONALES (34) 91 722 30 00  
FAX (34) 91 722 57 90  
[trafic@ifema.es](mailto:trafic@ifema.es)