

Reunión de los Comités de la A.I.P.C.R. (Comité de Materiales)

Dosificación de Mezclas Porosas. Ensayo Cántabro

Por D. Félix E. Pérez-Jiménez
Doctor Ingeniero de Caminos
Catedrático de Caminos y Aeropuertos
E.T.S.I. de Catalunya

La carencia de ensayos mecánicos que permitan evaluar las mezclas bituminosas porosas para su uso en capa de rodadura, hacen que su estudio y caracterización en laboratorio sea una difícil y ardua tarea.

Es por esta razón por la que se ha desarrollado el "Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste", con objeto de medir la resistencia de estas mezclas a los esfuerzos tangenciales y de abrasión del tráfico. El ensayo desarrollado es muy fiable y exacto y puede ser usado, no sólo en el proyecto de mezclas porosas, sino también en la dosificación de cualquier mezcla en la que la función del ligante sea, fundamentalmente, dar a la mezcla una buena cohesión.

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el "Laboratorio de Caminos y Aeropuertos" de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

Ha sido patrocinado por la Dirección General de carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

El estudio ha sido dirigido por D. Félix Edmundo Pérez Jiménez, Catedrático de Caminos y Aeropuertos, con la participación de los siguientes miembros del Departamento de Transportes de la Universidad de Cantabria: D. Miguel Angel Calzada Pérez, Dr. Ingeniero de Caminos; D. Jesús Gómez Bayón, Ingeniero de Caminos; D. Roberto González Bengochea, Técnico especialista.

El Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste

1. Motivos de su desarrollo

La escasa idoneidad que ofrecen los ensayos mecánicos tradicionales en la valoración de las propiedades de las mezclas abiertas, ha sido motivo de que hasta el momento no haya sido desarrollado ningún método que permita optimizar su dosificación.

Los procedimientos seguidos se basan en la selección de la granulometría más apropiada para obtener un porcentaje de huecos en mezcla dado y en la determinación del porcentaje de betún, de acuerdo con la superficie específica de los áridos y

el espesor de película de ligante deseado. O, simplemente, fijando el porcentaje de ligante de acuerdo con la experiencia.

La determinación del porcentaje de ligante a partir de la superficie específica del árido, es el procedimiento seguido especialmente en USA. La expresión dada por la FHWA para la determinación del porcentaje de ligante es la siguiente:

$$A = 2,0 K_c + 4,0$$

donde:

A = porcentaje en peso de betún referido al peso total de los áridos.

K_c = Superficie específica de la fracción de árido retenida por el tamiz 5 UNE.

En los estados de California y Colorado se utilizan expresiones similares:

$$A = 1,5 K_c + 3,5 \text{ (COLORADO)}$$

$$A = 1,5 K_c + 4,0 \text{ (CALIFORNIA)}$$

Los porcentajes de ligante así determinados son corregidos en los tres procedimientos, para tener en cuenta la densidad relativa real de los áridos utilizados.

$$A_c = A \times 2,65/d_r$$

donde:

A_c = Porcentaje de betún corregido.

d_r = Densidad relativa real del árido grueso.

En el procedimiento seguido por





Aspecto de un pavimento poroso con lluvia

el FHWA se comprueba también que con la dosificación de ligante seleccionada no se produce el escurrimiento de éste. Para ello se recurre a un ensayo de escurrimiento, consistente en observar si éste ocurre cuando se mantiene 1 hora la mezcla a la temperatura de envuelta. En el caso de que esto suceda se recomienda el empleo de un ligante más viscoso o cambiar la granulometría.

En el caso de las mezclas porosas, caso particular de las mezclas abiertas, se daban las mismas limitaciones en los procedimientos

empleados en su dosificación, que claramente repercutían en una insuficiente caracterización de sus propiedades. Por ello, se decidió investigar un nuevo procedimiento que permitiese una mejor dosificación y caracterización de estas mezclas.

Dado que el proyecto de las mezclas porosas se plantea como un compromiso claro entre su permeabilidad y su resistencia a la disgregación, se intentó en primer lugar estudiar la posibilidad que ofrecían los ensayos existentes en la valoración de esta última propiedad de la

mezcla.

En primer lugar se pensó en aquellos ensayos empleados para valorar la cohesión de mezclas densas y semidensas: cohesiómetro Hveem y ensayo de tracción indirecta. Se desechó en principio el ensayo triaxial por el laborioso y complicado proceso de fabricación de las probetas de ensayo.

Cohesiómetro Hveem

En el estudio de la aplicación del ensayo Hveem a la valoración de la cohesión de las mezclas porosas se

“Es un ensayo pensado para mezclas más frágiles, que resulta inadecuado cuando se emplea con mezclas deformables que no llegan a romperse ni a fisurarse durante el ensayo.”

modificó, respecto al procedimiento empleado con las mezclas densas, la temperatura de ensayo. Este se realizó a 25.° C en vez de 60.° C, dada la mayor flexibilidad de las mezclas ensayadas.

A pesar de esta modificación los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. Estos resultados muestran, figura 1, una pérdida de la cohesión Hveem al aumentar el porcentaje de ligante y, también, la escasa influencia que sobre su respuesta tiene la variación del porcentaje de árido fino. Resultados que están totalmente en desacuerdo con la experiencia existente sobre el comportamiento de estas mezclas. Su cohesión y resistencia a la disgregación aumentan con el contenido de ligante y de árido fino.

Este contrasentido es debido a la falta de idoneidad de este ensayo cuando se usa en la caracterización de este tipo de mezcla. Es un ensayo pensado para mezclas más frágiles, que resulta inadecuado cuando se emplea con mezclas deformables que no llegan a romperse ni a fisurarse durante el ensayo. En el ensayo, cuando se aplica a mezclas porosas, se determina el trabajo realizado hasta conseguir una determinada deformación de la probeta, pero no el necesario para producir su rotura.

Ensayo de tracción indirecta

Para comprobar la validez de este ensayo en la caracterización del comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas porosas se empleó una granulometría tipo, P-10 (15,4) –tamaño máximo del árido, 10 mm; 15% de árido fino y 4% de filler–, considerando distintas temperaturas: 15 y 30.° C, y distintas velocidades en la realización del ensayo: 0,4; 4 y 40 mm/min.

Para esta granulometría y pa-



Aspecto de un pavimento denso con lluvia

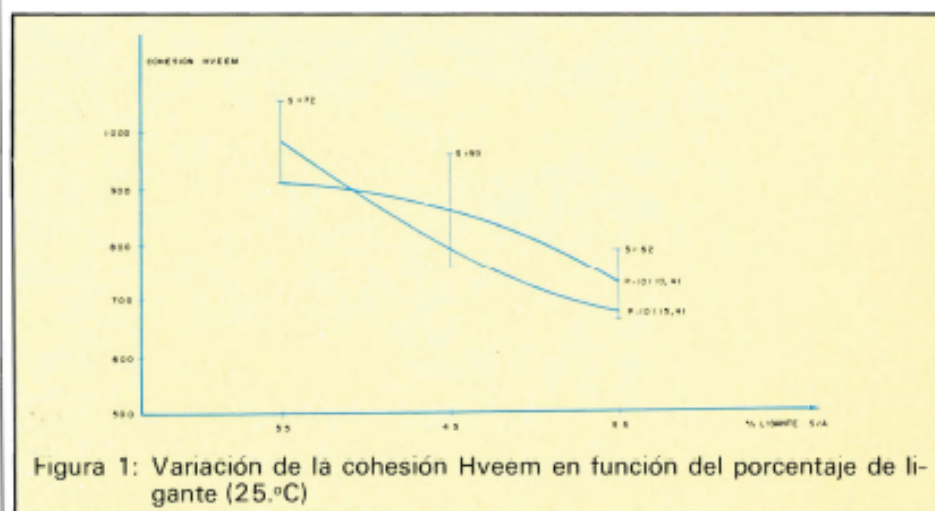


Figura 1: Variación de la cohesión Hveem en función del porcentaje de ligante (25.°C)

cada una de las temperaturas y velocidades señaladas se estudió en el laboratorio la influencia del porcentaje de ligante sobre la resistencia y deformación de rotura de la mezcla ensayada, así como sobre su módulo de rigidez instantáneo. El ligante empleado fue un betún de penetración B-60/70 y se ensayaron los siguientes porcentajes de ligante: 3.5; 4.5 y 5.5% sobre árido.

Los resultados de estos ensayos han sido representados en las figuras 2, 3 y 4, donde se recogen los resultados individuales con objeto de poder mostrar las fuertes dispersiones obtenidas en la medida de la deformación transversal y en la determinación del módulo de rigidez instantáneo. Dispersiones que aumentan con la velocidad y el porcentaje de ligante.

También se observa que la resistencia de rotura a tracción es insen-

sible a la variación del contenido de ligante. Esto junto con las fuertes dispersiones obtenidas en la medida de la deformación transversal y en la determinación del módulo de rigidez instantáneo aconsejó desestimar este ensayo en la caracterización de las mezclas porosas.

2. Fundamento y desarrollo del Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste

Fue precisamente la falta de un ensayo mecánico que permitiera evaluar la cohesión y resistencia a la disgregación de las mezclas porosas lo que motivó el desarrollo del Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste.

La experiencia existente sobre el comportamiento de estas mezclas indica, como ya se ha señalado an-

Figura 2: Ensayo de tracción indirecta. Variación de la tensión de rotura con la velocidad del ensayo y la temperatura. Granulometría P-10 (15,4). B-60/70

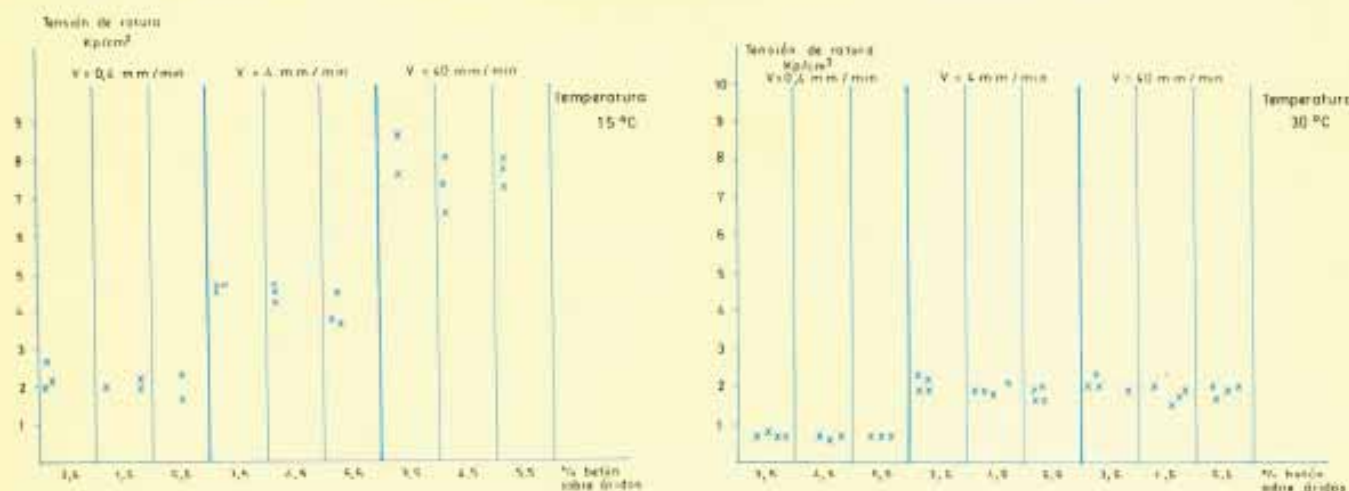


Figura 3: Ensayo de tracción indirecta. Variación de la deformación transversal en la rotura. Granulometría P-10 (15,4). Betún B-60/70.

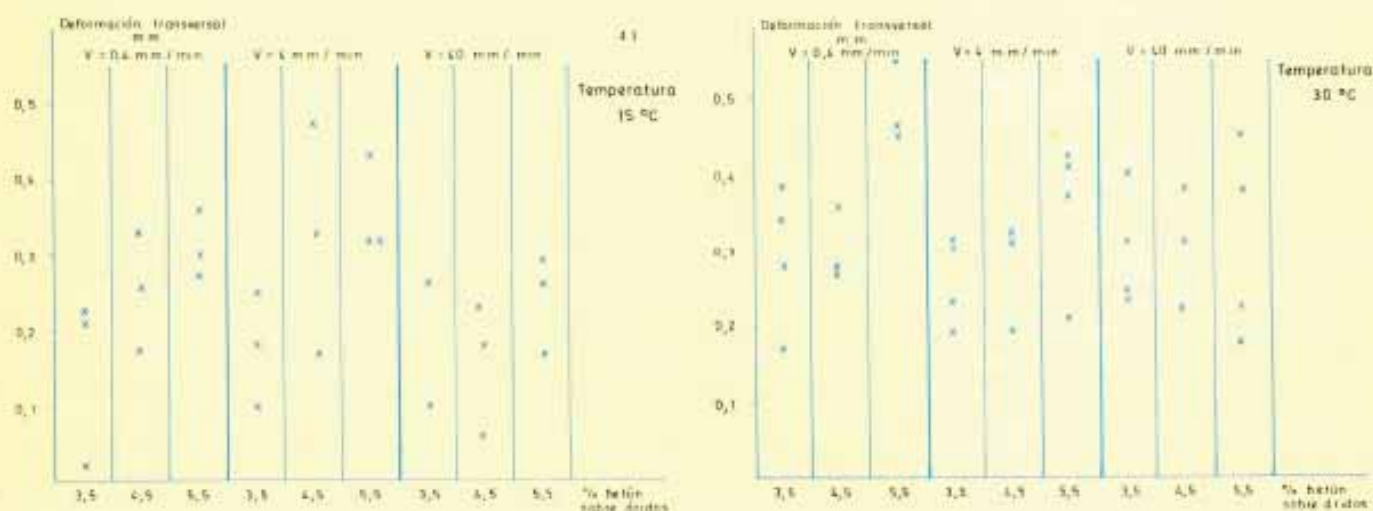
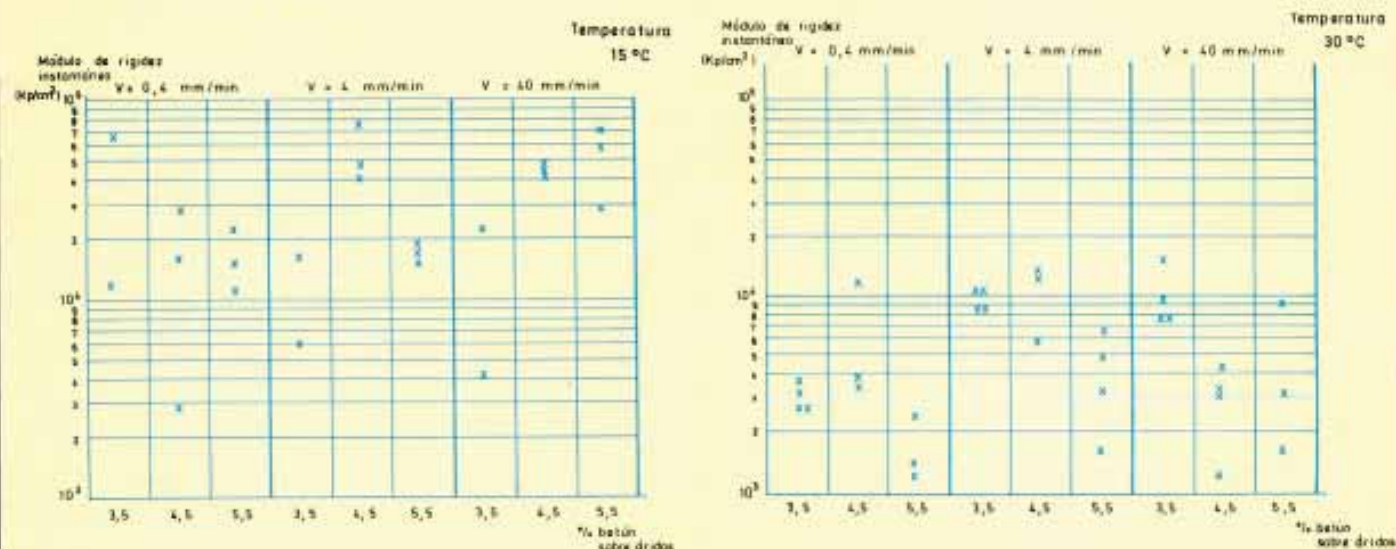


Figura 4: Variación del módulo de rigidez instantáneo con la temperatura y velocidad de deformación. Granulometría P-10 (15,4) B-60/70.



“**E**l ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se quiere estudiar una probeta tipo Marshall e introducirla en la máquina de ensayo de Los Angeles (sin bolas) a una temperatura de 18 ó 25.º C.”

teriormente, que sus fallos más frecuentes son las peladuras y pérdidas de áridos. Debido normalmente a una falta de cohesión que permita resistir adecuadamente los esfuerzos tangenciales y de succión del tráfico.

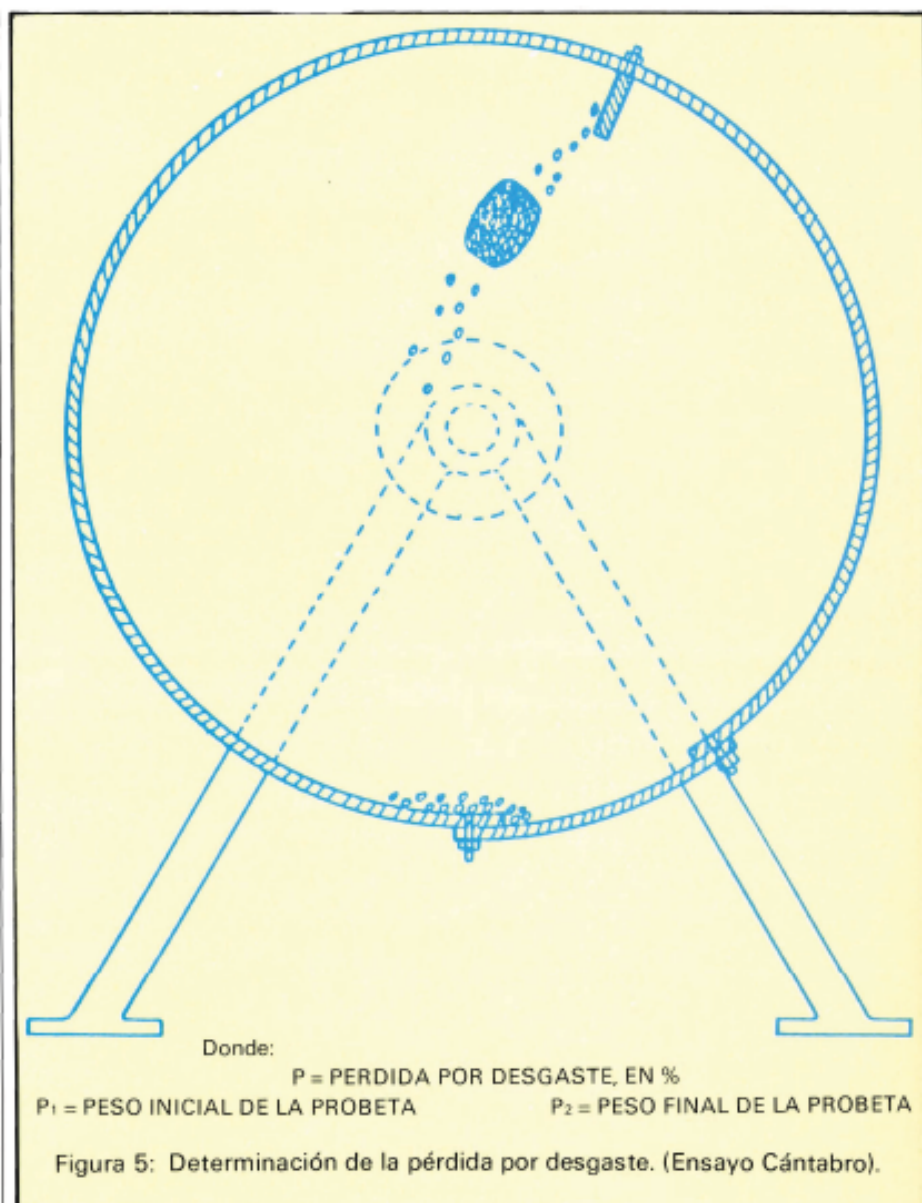
Esto hizo pensar que la falta de cohesión podía ponerse de manifiesto mediante algún ensayo que sometiera a la probeta a un mecanismo de abrasión que produjera la pérdida progresiva de los áridos mal adheridos. Por ello, se consideró la posibilidad de someter a probetas fabricadas en el compactador Marshall a un ensayo similar al utilizado con los áridos para determinar su pérdida por desgaste, ensayo de Los Angeles.

2.1 Procedimiento de ensayo

El ensayo consiste en fabricar con la mezcla que se quiere estudiar una probeta tipo Marshall e introducirla en la máquina de ensayo de Los Angeles (sin bolas) a una temperatura de 18 ó 25.º C, figura 5. Después de 300 revoluciones se saca la probeta, que durante el ensayo ha ido perdiendo por desgaste parte de los áridos situados en la superficie, y se pesa. Como resultado del ensayo se obtiene el valor de la pérdida por desgaste expresada en tanto por ciento del peso inicial.

Aparatos de ensayo

Máquina de desgaste de Los Angeles: la máquina empleada en el ensayo de desgaste Cántabro es la misma que se utiliza en el ensayo de desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Angeles (NLT-149/72), pero sin carga abrasiva. Las características de la má-



quina están definidas en el apartado 2.1 de la Norma NLT-149/72.

Preparación de las probetas de ensayo

La muestra ensayada consiste en una probeta cilíndrica ($\varnothing = 101,6$ mm) con un peso de 1 kg de áridos más el peso de ligante, compactada mecánicamente en la compactadora Marshall. El procedimiento seguido para la preparación de la probeta es el señalado en la Norma dada por el Laboratorio de Transportes y Mecánica del Suelo para determinar "la resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas aplicando el aparato Marshall" NLT-159/73, empleando una energía de compactación de 50 golpes por cara y una temperatura que en principio deberá corresponder a una viscosidad del ligante comprendida entre 700 y 900 centistokes.

Ejecución del ensayo

Para determinar la pérdida de desgaste de cada una de las probetas ensayadas se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se pesa en seco la probeta, con una aproximación de 0,1 gramos (P_1).
2. Se introduce la probeta en la máquina de Los Angeles sin ninguna clase de carga abrasiva, y se la somete a 300 revoluciones.
3. Se saca la probeta, que se habrá ido reduciendo por el desgaste, y se pesa con una aproximación de 0,1 gramos (P_2).

Resultado del ensayo

La pérdida de desgaste se expresa en tanto por ciento referido al peso inicial de la probeta.

Pérdida por desgaste = $\frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100$
donde:

P_1 = peso inicial probeta en g.
 P_2 = peso final probeta en g.

2.2 Sensibilidad del ensayo

Los resultados obtenidos al aplicar este método indican que el ensayo es capaz de detectar pequeñas variaciones en la composición de la mezcla. Esta sensibilidad es especialmente notable a la variación del contenido de ligante de la mezcla. Para una mezcla dada se observa una disminución de la pérdida por desgaste a medida que aumenta su contenido de betún, pero esta disminución, que es rápida cuando los contenidos de betún son bajos, llega a hacerse moderada cuando el porcentaje de ligante logra dar suficiente trabazón y cohesión a la mezcla. Es decir, se observa un cierto codo en las curvas tanto por ciento de pérdida por desgaste tanto por ciento de betún, que puede corresponder a un contenido de ligante suficiente para evitar la disgregación de la mezcla, figuras 6 y 7.

“Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que se trata de un método de ensayo capaz de detectar variaciones en el comportamiento de la mezcla cuando se modifican los porcentajes de los materiales que la componen.”

Este ensayo detecta también claramente el efecto que los finos y el filler tienen sobre la trabazón de la mezcla, ya que en todos los casos se produce una disminución de la pérdida cuando se aumentan los porcentajes de éstos.

Un indicador de la sensibilidad del ensayo a los componentes de la mezcla es el alto coeficiente de correlación obtenido ($r^2 = 0,935$) en el ajuste establecido entre $\sqrt{P}/100$ y las características de la mezcla: contenido de betún, árido fino y filler.

$$\sqrt{P}/100 = 1,7208 - 32,4018b + 281,8661b^2 - 1,4803f + 30,6641f^2 + 1,6448a - 35,2062ab - 30,17af - 0,0206t + 0,3899tb$$

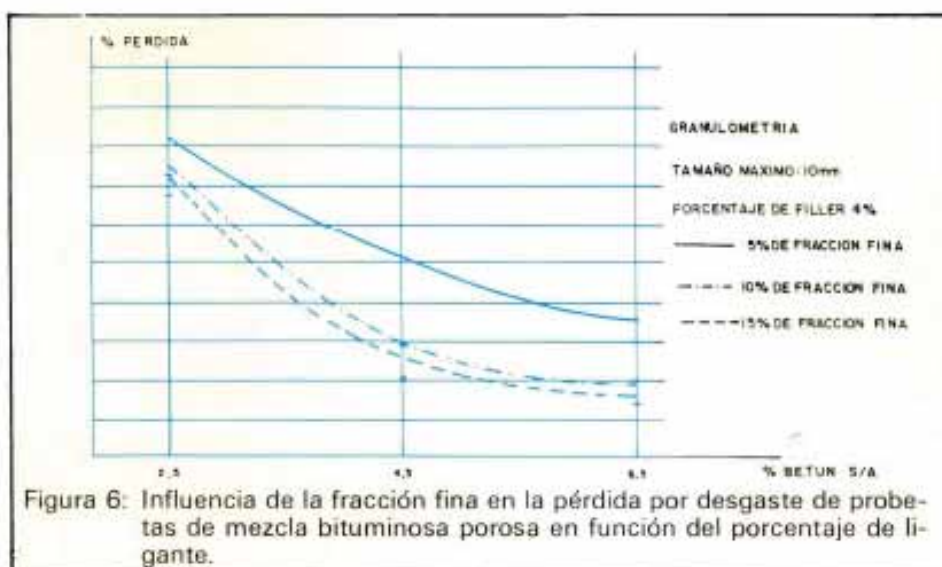


Figura 6: Influencia de la fracción fina en la pérdida por desgaste de probetas de mezcla bituminosa porosa en función del porcentaje de ligante.

donde

b = porcentaje de betún sobre áridos, en tanto por uno.

f = porcentaje de filler, en tanto por uno.

a = porcentaje de árido fino, en tanto por uno.

t = tamaño máximo del árido empleado, expresado en mm.

Esta correlación ha sido determinada a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de 36 formulaciones diferentes. Habiéndose variado el tamaño máximo del árido empleado: 10 y 12,5 mm, el porcentaje de árido fino: 10 y 15%, el porcentaje de filler: 2,4 y 6%, y el porcentaje de ligante: 3,5, 4,5 y 5,5%.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto, que se trata de un método de ensayo capaz de detectar variaciones en el comportamiento de la mezcla, cuando se modifican los porcentajes de los materiales que la componen, y por otra parte,

detalle muy importante, está directamente relacionado con los mecanismos de su deterioro.

3. Precisión del ensayo

Todo ensayo mecánico en su aplicación al proceso de medida de una propiedad de un material lleva asociada con él una precisión. Entendiendo por precisión el grado de mutua concordancia entre medidas individuales.

Al ensayar distintas muestras de un mismo material, manteniendo constante todas las condiciones de ensayo, lo más probable es que no obtengamos idénticos resultados. Esto es debido a los errores que se cometen en la preparación de probetas y el proceso de medida. Dependiendo de la precisión de este último oscilará también la mayor o menor proximidad entre las medidas individuales observadas.

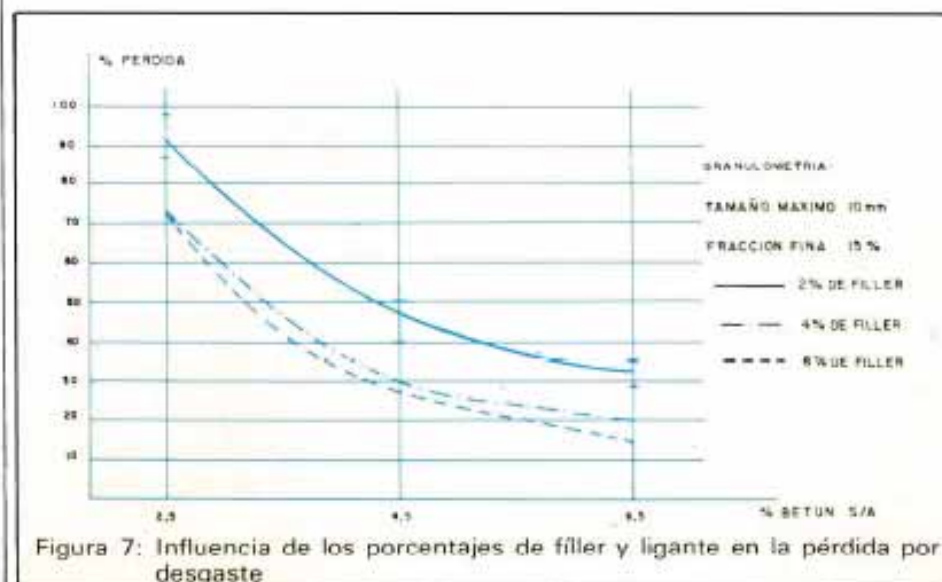


Figura 7: Influencia de los porcentajes de filler y ligante en la pérdida por desgaste

“La determinación de la varianza muestral del ensayo a partir de los valores obtenidos en el ensayo de formulaciones distintas es posible realizarla mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal.”

La precisión de un proceso de media la podemos establecer mediante un índice ($\pm a$), siendo a un número positivo. La base más usual para determinar este índice de precisión es la varianza muestral, S^2 , de la distribución estadística de las mediciones realizadas. Normalmente como índice de precisión se suele tomar el valor $\pm S$.

El índice de precisión variará si se modifica el sistema de causas, es decir, si cambia el operador, la máquina de ensayo, la compactadora, etc. Por ello, es muy importante definir las condiciones en que se ha determinado la precisión del proceso de medida. En nuestro caso, el índice estimado se refiere a un multioperador-probeta-día, y simple-laboratorio-aparato.

La varianza muestral S^2 del proceso, ha sido determinada a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de las 36 formulaciones, antes indicadas. De cada formulación se ensayaron de 2 a 3 probetas, siendo 79 el total de los valores empleados en su determinación.

La determinación de la varianza muestral del ensayo, a partir de los valores obtenidos en el ensayo de formulaciones distintas, es posible realizarla mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal. Para ello debemos de comprobar en primer lugar si existe una correlación entre las variables de las formulaciones empleadas y los resultados obtenidos. Hecho que en nuestro caso se manifiesta con un alto coeficiente de correlación $r^2 = 0.935$.

Otra de las hipótesis de cálculo para la determinación de S^2 mediante el empleo del método de regresión lineal es el supuesto de que la dispersión obtenida en el ensayo

de cualquier formulación es el mismo, independiente de su composición, contenido de ligante, porcentaje de árido fino, etc. Por esta razón, se ha empleado como variable dependiente $\sqrt[3]{P/100}$ en vez de P , puesto que con esta transformación se consigue mantener constante la dispersión de los resultados dentro del campo de experimentación. A la variable P le corresponde una mayor dispersión a medida que disminuye la resistencia de la mezcla ensayada.

Comprobada la posibilidad de la aplicación del modelo de regresión lineal en el análisis de resultados, se obtuvo para la variable $\sqrt[3]{P/100}$ una varianza residual, S^2 , de $5,43 \times 10^{-4}$. Es decir, que los valores que toma la variable $\sqrt[3]{P/100}$, en el ensayo de una formulación cualquiera se ajustan a una distribución normal de desviación típica, S , de $2,33 \times 10^{-2}$.

Una idea más clara de la precisión del ensayo nos la puede dar el coeficiente de variación C_v , de la variable $\sqrt[3]{P/100}$, definido como la relación entre la desviación muestral, S , y el valor medio.

Para las 36 formulaciones ensayadas el coeficiente de variación ha estado comprendido entre 0.028 y 0.046. Es decir, que la desviación muestral del ensayo es inferior en todos los casos al 5% del valor medio obtenido.

Con objeto de contrastar la precisión del ensayo, determinada mediante el empleo del análisis de regresión y comprobar mediante un nuevo análisis la repetibilidad del ensayo, se ha aplicado el test de la F de Snedecor a diferentes series de probetas fabricadas con la misma granulometría e idéntico porcentaje de ligante.

“Por último añadir que el ensayo tiene otras e interesantes aplicaciones. Se ha empleado para valorar el efecto de los ligantes especiales en la fabricación de mezclas porosas.”

El análisis de los resultados obtenidos al aplicar este test, tabla 1, nos indica con un nivel de significación del 95% que no existe diferencia significativa entre los valores medios obtenidos en el ensayo de las seis series.

Por otra parte, la varianza estimada mediante este procedimiento es similar a la determinada por el análisis de regresión lineal múltiple, $6,927 \times 10^{-4}$ y $5,43 \times 10^{-4}$, respectivamente.

4. Conclusiones

Como conclusión general, indicar que el ensayo está siendo empleado desde hace tiempo en España en la dosificación de mezclas porosas. Se ha publicado una norma de ensayo e incluso se han establecido unos criterios de proyecto para la dosificación de estas mezclas.

Estos criterios hacen referencia a la porosidad y resistencia al desgaste de las mezclas ensayadas y son los siguientes:

- los huecos en mezcla no deberían ser nunca inferiores al 18% y preferiblemente no serán inferiores al 20%.
- las pérdidas al Cántabro a 25.º C serán inferiores al 25% y, en general, inferiores al 20%.

Estos criterios junto con la experiencia española sobre este tipo de mezclas han sido recogidos en una Nota Técnica de la Dirección General de Carreteras.

Para terminar, señalar que el ensayo ya está siendo aplicado por otros laboratorios y administraciones, caso por ejemplo de Bélgica o de Alemania. En este sentido creo que sería bueno referirnos a los resultados de este ensayo como pérdidas en el Cántabro, no como pérdidas en Los Angeles, para no crear confusión y diferenciarlo por completo del ensayo empleado en la caracterización de áridos.

Por último, añadir que el ensayo tiene otras e interesantes aplicaciones. Se ha empleado para valorar el efecto de los ligantes especiales en la fabricación de mezclas porosas. Como ensayo para evaluar la adhesividad árido-ligante. Para estudiar el efecto de la finura y naturaleza del filler en la adherencia árido-ligante. Y también se ha desarrollado un procedimiento de dosificación de mezclas abiertas en frío basado en el ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste.

**TABLA 1 TEST F DE SNEDECOR PARA CONTRASTE DE MEDIAS
GRANULOMETRIA P-10 (15,4) B-60/70 %B = 4,5**

		1		2		3		4		5		6		7		8		9	
		P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$	P_j (%)	$\sqrt[3]{\frac{P_j}{100}}$
	1	22,0	.6037	16,6	.5496	21,3	.5972	23,8	.6197	22,2	.6055	26,5	.6423						
	2	24,7	.6274	16,6	.5496	20,7	.5915	24,1	.6223	21,6	.6000	22,6	.6091						
	3	22,4	.6073	23,5	.6171	25,8	.6366	26,1	.6391	25,3	.6325	19,0	.5749						
	4	17,7	.5615	19,7	.5819	27,1	.6471	23,9	.6206	26,6	.6431	24,7	.6274						
	5	16,5	.5485	24,2	.6232	21,6	.6000	22,8	.6109	24,9	.6291	25,3	.6325						
$\bar{x}_1$		20,5*	.5897	19,9*	.5843	23,2*	.6145	24,1*	.6225	24,1*	.6220	23,5*	.6172						
S_1			.02975		.03163		.02276		.00917		.01651		.92377						

$$\bar{X} = 22,5$$

$$\bar{X} = .6084$$

$$S_R = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^5 (X_{ij} - X_i)^2 = 5 \sum_{i=1}^6 S_i^2 = 1.662 \cdot 10^{-2} \quad S^2 = \frac{S_R}{30-6} = 6,927 \cdot 10^{-4}$$

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^6 5(\bar{X}_i - \bar{X})^2}{6-1} = 1,434 \cdot 10^{-3}$$

$$S_n^2/S^2 = 2,07 < F(5,24,0.05) = 2,62$$

$$\bar{X}_1^* = 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^5 \sqrt[3]{P_i/100}}{5} \right]^3$$

Bibliografía

1. CALZADA, M.A. *Desarrollo y normalización del ensayo de pérdida por desgaste aplicado a la caracterización, dosificación y control de mezclas bituminosas de granulometría abierta*. Tesis Doctoral E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Santander, 1984.

2. PEREZ JIMENEZ, F.E.; KRAEMER, C. y LACLETA, A. "Enrobes drainants. Etude de leurs caracteristiques en laboratoire et construction des premiers tronçons d'essais espagnols". Eurobitume

Symposium. Cannes, 1981.

3. PEREZ JIMENEZ, F.; KRAEMER, C. y LACLETA, A. "Mezclas bituminosas porosas". Nota Técnica. Dirección General de Carreteras M.O.P.U. Madrid, 1982.

4. PEREZ JIMENEZ F. y CALZADA, M. "Mezclas bituminosas porosas". Evaluación y análisis de los tramos experimentales en la carretera N-634 E.T.S.I.C.C.P. Santander, 1985.

5. *International Symposium on Porous Asphalt*. Amsterdam, 1976.

Study Centre for Road Construction. Arnhem, 1976.

6. *International Workshop on Porous Asphalt*. Brumisse, 1981. Study Centre for Road Construction. Arnhem, 1981.

7. *Open-graded Friction Courses for Highways*. NCHRP Synthesis 49. Transportation Research Board. Washington, 1978.

8. *Mezclas Bituminosas Porosas*. Nota Técnica. Dirección General de Carreteras M.O.P.U. Madrid, 1987.