

# EL ENSAYO DE ADHERENCIA DE CAPAS SEGÚN NLT-382: INFLUENCIA DE LA DOTACION DE LIGANTE Y LA MACROTEXTURA

### **J. M. BERENGUER**

Grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS  
Eiffage Infraestructuras  
jberenguer@infraestructuras.eiffage.es

### **P. HERNÁNDEZ**

Grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS  
Demarcación del Ministerio de Fomento en Murcia

### **R. GOMARIZ**

Grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS  
Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia

### **I. GARCÍA**

Grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS  
Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia

### **C. CALVO**

Grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS  
Centro Regional de Control de Calidad. Junta de Castilla  
y León

### **T. REAL**

Grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS  
Universidad de Alicante

---

# EL ENSAYO DE ADHERENCIA DE CAPAS SEGÚN NLT-382: INFLUENCIA DE LA DOTACION DE LIGANTE Y LA MACROTEXTURA

---

## RESUMEN

**E**l grupo de trabajo de adherencia de capas se creó dentro de la asociación ALEAS en 2016 con el fin de profundizar en el conocimiento del ensayo de adherencia de capas descrito en la norma NLT-382. Esta norma es la que especifica el artículo 530 del PG-3, para verificar que la resistencia al esfuerzo cortante supera el valor de 0,60 MPa, cuando una de las capas sea de rodadura, o de 0,40 MPa en el resto de casos, y también se establecen penalizaciones cuando no se alcance el 90% de este valor, o cuando esté entre el 90 y el 100%. Dado que en esta norma se permite el uso de dos dispositivos de corte diferentes, se consideró fundamental realizar un estudio comparativo de los resultados obtenidos con ambos dispositivos. Por ello, en una primera etapa se realizaron ejercicios interlaboratorio con cada uno de los dispositivos. Para realizar estos interlaboratorios se fabricaron los testigos en laboratorio, con el fin de controlar la homogeneidad de las capas soporte y superior y la dotación de emulsión en el riego de adherencia. Después, se realizó una campaña de extracción de testigos en dos tramos de prueba. Los valores medios obtenidos fueron menores que los encontrados en los testigos preparados en laboratorio, y como era de esperar, las dispersiones de los resultados también fueron mayores. A continuación se determinan dotaciones óptimas para distintos tipos de mezclas, con diferentes macrotexturas. Los resultados obtenidos muestran la dependencia de la dotación óptima con la macrotextura y el estado y dotación del ligante en las mezclas adheridas. Finalmente, se ha desarro-

llado un modelo de elementos finitos para obtener las tensiones tangenciales que pueden llegar a la unión entre distintas capas de un paquete de mezcla bituminosa.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con la modificación del artículo 531 del PG-3 en diciembre de 2014, se establece la necesidad de realizar el ensayo de adherencia entre capas según NLT-382, para verificar que la resistencia al esfuerzo cortante supera el valor de 0,60 MPa, cuando una de las capas sea de rodadura, o de 0,40 en el resto de casos. También se establecen penalizaciones cuando no se alcance el 90% de este valor, o para cuando esté entre el 90 y el 100%. Es por ello de gran importancia profundizar en el conocimiento de este ensayo, que permite el uso de dos dispositivos de corte diferentes (Figura 1) para realizar el ensayo, sin que se disponga de datos suficientemente contrastados que aseguren la equivalencia de los resultados obtenidos. Además, se está revisando la norma europea EN 12697-48 para evaluar la adherencia entre capas, en la que se proponen diferentes métodos alternativos para evaluar este parámetro, entre los que se encuentran ambos dispositivos, aunque varía la velocidad de aplicación de la carga.

En el dispositivo A la carga se aplica mediante una mordaza de dos cuerpos, contenidas en un plano perpendicular al testigo-probeta, sobre el que se aplica un esfuerzo en la interfaz de las dos capas (esfuerzo cortante puro).

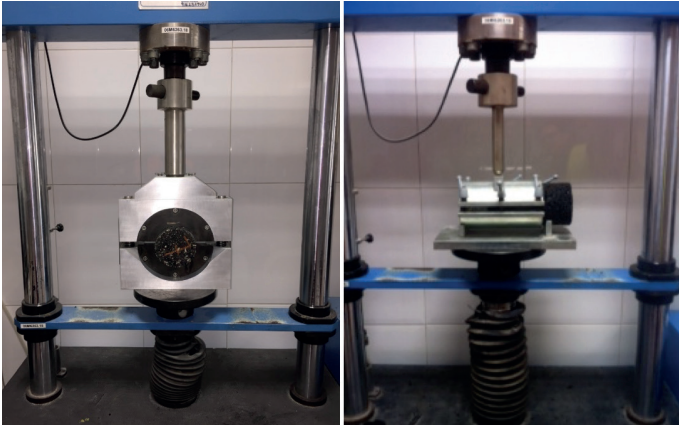


Figura 1. Dispositivos de corte A y B de la NLT 382/08.

El dispositivo B consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en la que se introduce el testigo-probeta. El punto de aplicación de la carga está equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, que actúa, así como una viga biapoyada, donde la sección de ensayo está sometida a esfuerzo cortante.

Los objetivos de este trabajo son:

- Evaluar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos con los dispositivos incluidos en la norma y estimar la precisión del ensayo.
- Analizar, con testigos de campo, como influyen en los valores de adherencia la diferente dotación de emulsión y el tipo de mezclas utilizadas.
- Establecer, para diferentes tipos de mezclas, la relación entre la dotación de ligante residual y los parámetros del ensayo (resistencia a esfuerzo cortante y energía).
- Desarrollar un modelo de elementos finitos para obtener las tensiones tangenciales que pueden llegar a la unión entre distintas capas de un paquete de mezcla bituminosa.

## 2. PLAN EXPERIMENTAL

### 2.1. Ejercicios interlaboratorio

Se han llevado a cabo 2 ejercicios interlaboratorio: El primero con el dispositivo B y el segundo con el

dispositivo A, en dos años consecutivos. Previamente, se distribuyó entre los laboratorios participantes el protocolo para la realización del ejercicio de intercomparación, así como los materiales necesarios: mezcla bituminosa AC16S, fabricada por Los Serranos (Grupo Eiffage), y dos emulsiones termoadherentes proporcionadas por Cepsa. La primera es una emulsión termoadherente C60B3, fabricada con un ligante convencional, mientras que el ligante de la segunda es un betún modificado C60BP3.

Las muestras de ensayo se prepararon del modo siguiente:

- Las probetas soporte, de 100 mm de diámetro, se fabricaron con la mezcla AC16S, mediante compactador giratorio (UNE-EN 12697-31), empleando los siguientes parámetros:
  - Presión: 600 kPa. Ángulo: 0,82°.
  - Nº de giros totales: 288.
  - Temperatura de compactación: 170°C.
  - Pre calentamiento de la muestra y los moldes: 2 horas.
- Estas probetas se cortaron para que su altura final fuera de 65 mm. Sobre la superficie de corte se extendió la emulsión a una dotación de 200 g/m<sup>2</sup> de betún residual.
- Para la capa superior se empleó el mismo tipo de mezcla. La compactación se realiza a la temperatura de 170°C siguiendo el procedimiento descrito en la norma NLT-161, mediante una prensa de doble émbolo aplicando una presión máxima de 21 MPa mantenida durante 2 minutos.

El ensayo se realiza a 20°C, con una velocidad de carga de 2,5 mm/min. A partir del gráfico carga-deformación de cada probeta ensayada se determinan las siguientes magnitudes:

- Carga máxima de rotura,  $F_{max}$ , expresada en N.
- Resistencia al esfuerzo cortante,  $T_c$ , calculada a partir de la carga máxima de rotura mediante la expresión:

$$Tc = F_{\max} / S \text{ (rotura con el dispositivo A)}$$

$$Tc = (F_{\max} / 2) / S \text{ (rotura con el dispositivo B)}$$

Donde S es la superficie de la sección transversal, en mm<sup>2</sup> y Tc es la resistencia de corte en N/mm<sup>2</sup> (MPa). También se determina la energía de deformación hasta rotura E<sub>d</sub>, correspondiente al área limitada bajo la curva de ensayo hasta alcanzarse el valor de carga máxima.

## 2.2. Testigos extraídos del firme.

Se extrajeron testigos de dos tramos de prueba. El primer tramo de prueba forma parte de una rehabilitación del firme de la RM-15 ejecutada el 05/10/2016 en el pk.36+400 del camino de servicio mediante la extensión de una capa de rodadura BBTM 11B sobre soporte existente tipo S-20 ejecutado a principio del año 2000. La dotación de emulsión en el riego de adherencia, fue en una mitad de la calzada de 0,5 kg/m<sup>2</sup>, y en la otra mitad de la calzada 1,0 kg/m<sup>2</sup>. En ambos casos el tipo de emulsión fue C60BP3TER. Son los tramos identificados como MS en la tabla 3 y en la figura 4.

El segundo tramo de prueba, también en la rehabilitación del firme de la RM-15 fue ejecutado el 03/11/2016 en el pk.36+600 del camino de servicio mediante una capa de rodadura BBTM 11B sobre soporte existente de BBTM 11B, ejecutado a principio del año 2016. La dotación de emulsión en el riego de adherencia fue, en una mitad de la calzada de 0,5 kg/m<sup>2</sup>, y en la otra mitad de la calzada 1,0 kg/m<sup>2</sup>. En ambos casos el tipo de emulsión fue C60BP3TER. Son los tramos identificados como MM.

La extracción de los testigos se realizó en marzo de 2018. Los ensayos se realizaron en seis laboratorios. Cada uno de los laboratorios recibe 8 testigos de cada tramo de prueba, para que ensaye 4 con el dispositivo A y 4 con el B, en las condiciones establecidas en la NLT-382. Los laboratorios participantes son:

- Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia.

- Laboratorio de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Murcia.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava.
- Universidad Politécnica de Cataluña.
- Centro Regional de Control de Calidad. Junta de Castilla y León.

## 2.3. Determinación de dotaciones óptimas

Se planteó trabajar con cuatro macrotexturas diferentes en la capa soporte y dos en la capa superior, con dotaciones teóricas de 0, 200 (mínima del PG-3), 500 y 800 g/m<sup>2</sup>. Los ensayos se realizaron en 6 laboratorios, que siguen trabajando con los dos dispositivos y una emulsión, C60BP3.

El plan de trabajo seguido fue:

- Seleccionar los tramos de extracción de testigos AC y BBTM, que se utilizaran como probetas soporte
- Medir la macrotextura en esos tramos, con perfilómetro laser y círculo de arena
- Extracción de testigos (mínimo 288 AC y 144 BBTM)
- Fabricación de mezclas (420 kg AC y 840 kg BBTM)
- Fabricación de probetas soporte con giratoria (mismo n° y tipo que testigos)
- Determinar la macrotextura de estas probetas. Para ello se prepararon probetas de pista y se midió la macrotextura con el círculo de arena.
- Envío de testigos, probetas (capa soporte), mezclas (capa superior) y emulsión
- Envío de protocolo

Estos trabajos finalizaron el mes de julio de 2018. En cada uno de los 6 laboratorios participantes, los trabajos se establecen en 6 bloques, como se esquematiza en la figura siguiente:

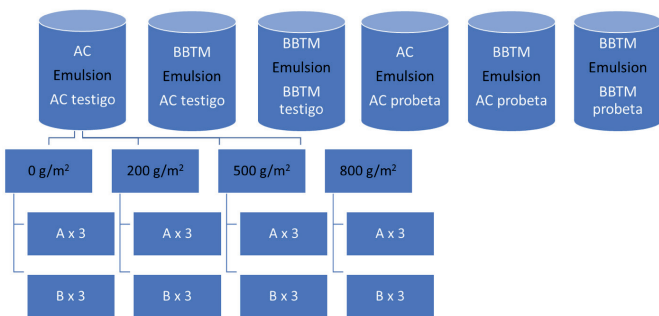


Figura 2. Plan experimental para determinar la dotación óptima en distintos tipos de mezclas.

En los dos primeros la capa soporte fué un testigo de mezcla tipo AC sobre la que se compacta mezcla AC o BBTM y en el tercero la capa soporte es un testigo de mezcla BBTM sobre la que se compacta mezcla BBTM. En los tres bloques siguientes la combinación de mezclas es la misma, pero la capa soporte fue una probeta fabricada en giratoria. En cada bloque se preparan 24 testigos: 6 testigos para cada dotación, y se ensayaron tres con el dispositivo A y tres con el B.

Todas las probetas soporte y las mezclas para compactar la capa superior utilizadas en este estudio han sido fabricadas por Aglomerados Los Serranos. Como en todas las fases del estudio, la emulsión ha sido proporcionada por CEPESA. Los laboratorios participantes son los mismos del apartado 2.2.

A diferencia de los realizado en el apartado 2.1, las probetas soporte no se cortaron. La dotación exacta de ligante residual se determina por pesada, una vez transcurridas 24 horas desde la extensión de la emulsión.

Según se observó en los apartados anteriores, las probetas confeccionadas en el laboratorio arrojan valores de adherencia bastantes superiores a los testigos de obra. En ensayos realizados en el Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia, se comprobó que la resistencia a esfuerzo cortante era proporcional a la presión de carga utilizada en la compactación mediante el doble émbolo, siendo mayor la resistencia cortante entre capas por el

efecto de la presión de carga que por la concentración del betún residual entre las mismas. Éste hecho explica la diferencia de resistencias entre lo que se obtiene en obra y en el laboratorio. El confinamiento del material junto con una presión de carga de compactación tan alta, 21 MPa, supera con creces la fricción que se produce entre las capas en obra. Por esto se realizaron, sin emulsión, rampas de compactación a distintas presiones de carga para cada tipo de combinación de mezcla, AC/AC y BBTM/BBTM. Según los datos obtenidos, se establece que la rampa de compactación que se debe de utilizar para compactar las mezclas tipo BBTM, sobre cualquier probeta soporte, será de 5 MPa, mientras que para las mezclas tipo AC será de 10 MPa.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Ejercicios interlaboratorio

En el ejercicio interlaboratorio con el dispositivo B participaron 13 laboratorios, mientras que en el ejercicio con el dispositivo A, realizado un año después, participaron 14 laboratorios. Cada uno de estos laboratorios ha realizado 6 réplicas del ensayo para cada emulsión. Para realizar el tratamiento, se eliminaron los valores extremos, de modo que n=4.

Los parámetros analizados son resistencia a esfuerzo cortante y energía de deformación. La energía se ha calculado como el área bajo la curva carga-deformación hasta carga máxima, como se indica en la siguiente figura:

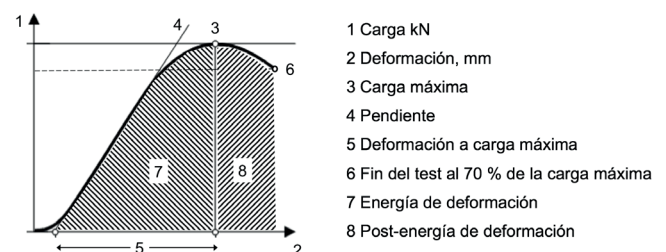


Figura 3. Cálculo de la energía y post-energía de deformación.

El tratamiento estadístico de los datos comienza

con la detección de datos anómalos, mediante técnicas gráficas de consistencia (h y k de Mandel) y test de Cochran y Grubbs. Una vez eliminados los datos anómalos se procede al cálculo de la media general y de las varianzas. Se calcula la varianza de repetibilidad, la varianza interlaboratorios y la varianza de reproducibilidad, según UNE 82009-2, y la media y la desviación estándar robusta mediante la norma ISO 13528.

**3.1.1. Resultados para resistencia a esfuerzo cortante.**

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos con la emulsión C60B3 y C60 BP3 en cada uno de los dispositivos.

Tabla 1. Resultados para resistencia a esfuerzo cortante.

	Emulsión C60B3				Emulsión C60BP3			
	Dispositivo A		Dispositivo B		Dispositivo A		Dispositivo B	
	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528
Media, mm	1,84	1,85	1,34	1,34	1,94	1,99	1,37	1,38
s <sub>r</sub>	0,17		0,13		0,13		0,12	
s <sub>R</sub>	0,25	0,20	0,20	0,19	0,30	0,19	0,21	0,12
% CV <sub>r</sub>	9,0		9,4		6,9		9,1	
% CV <sub>R</sub>	13,5	10,9	15,2	14,0	15,3	9,5	15,6	8,3

Con estos datos, podemos establecer que la precisión obtenida con ambos dispositivos es comparable, con coeficientes de variación de repetibilidad entre el 5-10% y coeficientes de variación de reproducibilidad entre el 10-15%. Además, los valores medios obtenidos con el dispositivo A son mayores que los obtenidos con el B, en este caso del orden del 27-30%. No se observan diferencias significativas entre los resultados obtenidos con cada emulsión a la temperatura del ensayo, de 20°C.

**3.1.2. Resultados para energía de deformación**

En la tabla 3 se resumen los resultados obtenidos con la emulsión C60B3 y C60 BP3 en cada uno de los dispositivos.

Los valores de precisión obtenidos con el dispositivo A mejoraron sustancialmente los obtenidos en el ejercicio del año anterior con el dispositivo B. No se puede asegurar que sea debido al uso del dispositivo de corte A, sino más bien a que los laboratorios revisaron la

forma de cálculo de esta energía. En el ejercicio con el dispositivo A se ha mejorado considerablemente la homogeneidad de los resultados, con ambas emulsiones, y se han conseguido coeficientes de variación de reproducibilidad por debajo del 20%.

Tabla 2. Resultados para energía de deformación.

	Emulsión C60B3				Emulsión C60BP3			
	Dispositivo A		Dispositivo B		Dispositivo A		Dispositivo B	
	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528
Media, julios	8,7	8,9	11,4	9,3	9,4	9,3	9,8	8,6
s <sub>r</sub>	1,0		1,3		1,3		1,2	
s <sub>R</sub>	1,6	1,3	8,2	3,2	1,5	1,1	6,1	2,5
% CV <sub>r</sub>	12		11		13		12	
% CV <sub>R</sub>	19	15	72	35	16	12	62	30

Aunque las precisiones obtenidas fueron muy diferentes y pueden afectar a la comparación de los valores medios, no se observaron diferencias significativas en los valores medios de energía de deformación obtenidos con ambos dispositivos.

**3.2. Testigos extraídos del firme**

Se realiza el tratamiento estadístico para cada tramo de prueba y dispositivo de corte. Para el tratamiento de los datos se sigue el mismo esquema que en apartado 3.1.

Tabla 3. Resistencia a esfuerzo cortante en testigos extraídos del firme, en MPa.

	MM 0,5 kg/m <sup>2</sup>		MM 1 kg/m <sup>2</sup>		MS 0,5 kg/m <sup>2</sup>		MS 1 kg/m <sup>2</sup>	
	Disp. A	Disp. B	Disp. A	Disp. B	Disp. A	Disp. B	Disp. A	Disp. B
Valor medio	0,713	0,512	0,521	0,420	0,696	0,389	0,584	0,389
s <sub>r</sub>	0,141	0,054	0,113	0,050	0,223	0,049	0,141	0,070
s <sub>R</sub>	0,178	0,089	0,173	0,072	0,264	0,062	0,145	0,106
CV <sub>r</sub>	20	11	22	12	32	13	24	18
CV <sub>R</sub>	25	17	33	17	38	16	25	27

Los valores medios obtenidos para la resistencia al esfuerzo cortante se muestran en la tabla 3. Se obtienen valores más altos con el dispositivo A (Figura 4). El aumento en la dotación de emulsión reduce el valor de resistencia al esfuerzo cortante. En cuanto al cumplimiento con las especificaciones, solo los datos obtenidos con el dispositivo A y dotaciones de emulsión de 0,5 kg/m<sup>2</sup> aseguran el cumplimiento del valor establecido en el PG-3 cuando una de las capas es de rodadura. Sí cumplirían la especificación para capas intermedia-base.

EL ENSAYO DE ADHERENCIA DE CAPAS SEGÚN NLT-382: INFLUENCIA DE LA DOTACION DE LIGANTE Y LA MACROTEXTURA

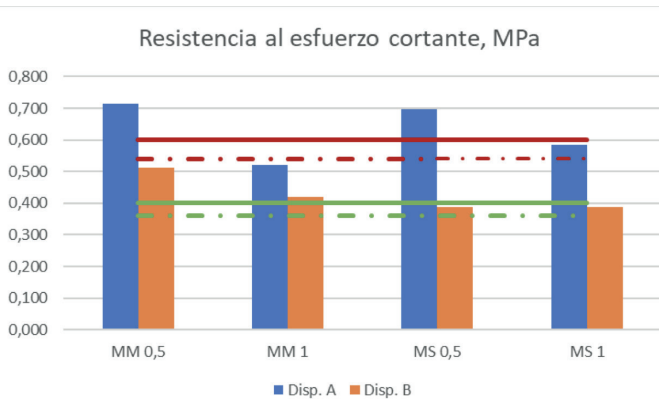


Figura 4. Valores medios de resistencia a esfuerzo cortante en testigos y especificaciones (en línea continua valor de especificación y en discontinua el 90% del valor).

Para deformación a carga máxima y energía de deformación, las altas dispersiones encontradas, tanto en términos de repetibilidad ( $CV_r$  del orden del 30%) como de reproducibilidad ( $CV_R$  superiores al 50%) con ambos dispositivos, no permiten establecer comparaciones entre los resultados.

En todos los casos la dispersión de los valores es mucho mayor que la encontrada en testigos preparados en laboratorio.

3.3. Determinación de dotaciones óptimas

En la Figura 5 se muestran los resultados medios obtenidos para mezclas AC-AC. En términos de resistencia a esfuerzo cortante, el dispositivo A condujo a valores más elevados que el dispositivo B. En términos de energía (Energía de deformación ESBT y suma de energía de deformación y postdeformación E), los valores también fueron mayores cuando la capa soporte es una probeta, pero las diferencias no fueron significativas cuando es un testigo.

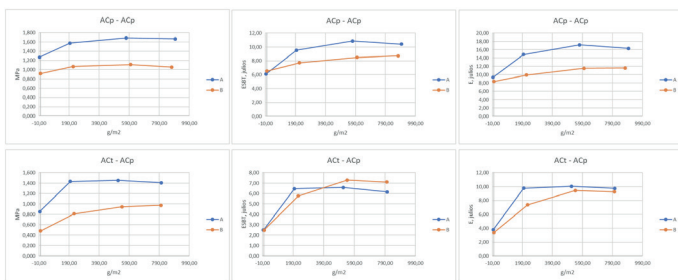


Figura 5. Resistencia a esfuerzo cortante y energía vs dotación para mezclas AC-AC.

Si se comparan los valores obtenidos cuando la probeta soporte es un testigo (gráficos ACt-ACp) y una probeta (gráficos ACp-ACp), observamos valores más altos de todos los parámetros cuando la capa soporte es una probeta fabricada en laboratorio. Estos soportes presentan diferentes macrotexturas, menor en probetas fabricadas en laboratorio que en testigos extraídos del firme, es decir, los valores son más altos para menores macrotexturas. Las dotaciones óptimas se encuentran en torno a 400-600 g/m<sup>2</sup> de betún residual, tanto en términos de resistencia a esfuerzo cortante como en energía.

Se llega a las mismas conclusiones cuando se ensayan testigos de AC-BBTM, como muestra la Figura 6: Valores más altos en todos los parámetros para el dispositivo A, y valores más bajos cuando la capa soporte es un testigo, es decir, a macrotexturas mayores.

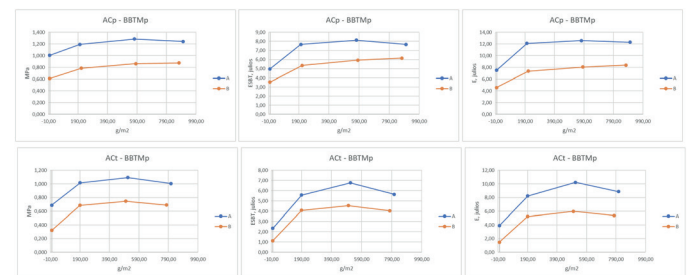


Figura 6. Resistencia a esfuerzo cortante y energía vs dotación para mezclas AC-BBTM.

A medida que aumenta la macrotextura, se observa mejor la diferencia entre los dos dispositivos, tanto en términos de resistencia a esfuerzo cortante como de energía. Finalmente, en el caso de BBTM-BBTM, los resultados son similares, en cuanto a influencia del tipo de dispositivo y macrotextura.

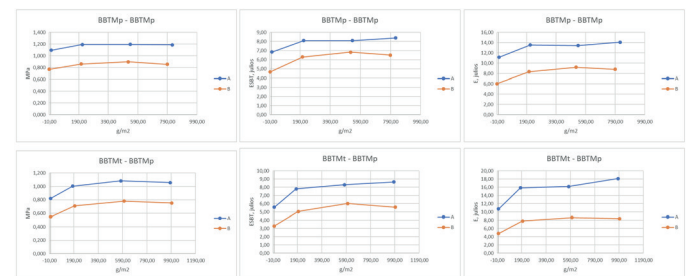


Figura 7. Resistencia a esfuerzo cortante y energía vs dotación para mezclas BBTM-BBTM.

En la Figura 8 se muestran los valores medios globales por dispositivo y mezclas. Se confirma la diferencia significativa entre los resultados proporcionados por cada dispositivo, y se confirman los resultados que veíamos antes en cada curva.

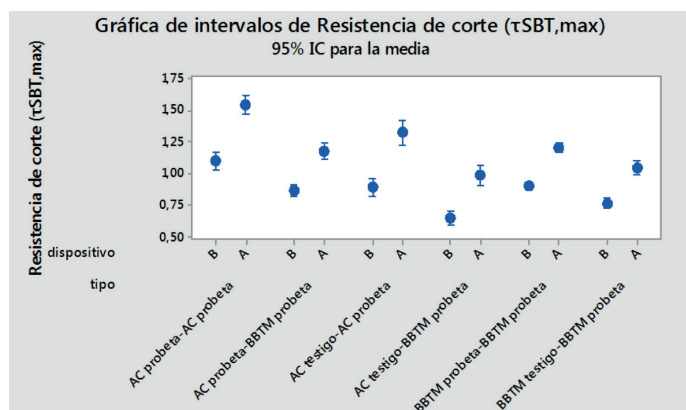


Figura 8. Valores medios globales por dispositivo para cada combinación de mezclas.

Los valores más altos se obtienen para las combinaciones AC-AC, y entre estas son más altos cuando la macrotextura de la capa soporte es menor. Los siguientes mejores resultados se obtienen para mezclas con probetas soporte (ACp-BBTM, del orden de los obtenidos con BBTBp-BBTM), y los peores resultados serían para capa soporte testigos y capa superior BBTM.

La combinación ACprobeta-AC (Macrotexturas 0,70 – 0,70) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre dos mezclas tipo AC recién extendidas entre sí. Presenta los resultados más altos en resistencia de corte y energía. Es la que tiene macrotextura más baja, 0.70, que ayuda a retener en su superficie mayor cantidad de emulsión. La combinación ACtestigo-AC (0,82 – 0,70) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo AC agotada y la extensión de una nueva AC sobre ella. Es una de las combinaciones que se utiliza con más frecuencia en los refuerzos de firme. Son los que obtienen los segundos mejores resultados de todas las combinaciones, solo por debajo de la combinación ACprobeta-ACprobeta

La combinación ACprobeta-BBTM (0,70 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una mezcla tipo BBTM extendida sobre una AC

nueva. Si la comparamos con la ACprobeta-AC, sus resultados son menores lo que nos indica que la macrotextura de la capa superior también influye, pero si lo comparamos con la ACtestigo-BBTM, los valores son más altos. La combinación ACtestigo-BBTM (0,82 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo AC agotada y la extensión de un micro BBTM sobre ella. Es la combinación que arroja el peor resultado. Si la comparamos con la combinación ACtestigo-AC, se confirma que el incremento de la macrotextura de la capa superior afecta de forma negativa a la resistencia a cortante.

La combinación BBTMprobeta-BBTM (1,90 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo BBTM nueva y la extensión de un micro BBTM sobre ella. En la práctica, es una combinación que no se utiliza. Es una combinación que se encuentra en la zona media de todas las ensayadas debido, por un lado, a su alto valor a cortante con dotación cero y, según lo observado en laboratorio, a la interacción y anclaje de las partículas entre las dos mezclas con alta macrotextura. De igual forma, el betún residual de la mezcla favorece ese incremento a dotación cero, que en la siguiente combinación ensayada, BBTM-testigo-BBTM, desaparece.

Finalmente, la combinación BBTMtestigo-BBTM (2,65 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo BBTM agotada y la extensión de un micro BBTM sobre ella. En la práctica es una combinación que no se utiliza por dudas respecto a su comportamiento frente a la adhesión entre sus capas pero que, según nuestros ensayos, se comporta prácticamente igual que la más utilizada ACtestigo-BBTM.

El siguiente paso es determinar la dotación óptima, para ello ajustamos las curvas resistencia a esfuerzo cortante/dotación para las distintas combinaciones de mezclas y determinamos el máximo. Los resultados se muestran en la Figura 9, donde se han indicado también las dotaciones mínimas recogidas en el PG-3 y los valores mínimos de resistencia a esfuerzo cortante. En valores globales se observa como mejora la adherencia al aumentar la dotación, hasta llegar a un máximo,



**EL ENSAYO DE ADHERENCIA DE CAPAS SEGÚN NLT-382: INFLUENCIA DE LA DOTACION DE LIGANTE Y LA MACROTEXTURA**

en torno a 400-600 g/m<sup>2</sup>, para luego disminuir o prácticamente mantenerse, según el tipo de mezcla, a 800 g/m<sup>2</sup>.

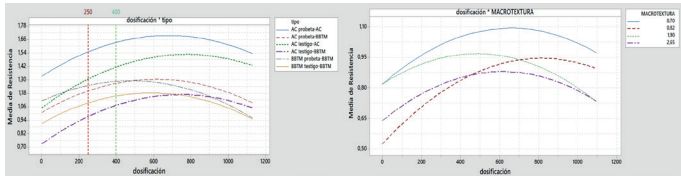


Figura 9. Estimación de dotación óptima para cada combinación de mezclas.

Finalmente, se relacionaron los valores de resistencia a esfuerzo cortante obtenidos para cada dotación con los valores teóricos máximos, entendiendo éstos como los que produciría una probeta continua de cada tipo de mezcla. Los resultados se muestran en la tabla 4: valores medios del 66% (entre 58 y 74 % según el tipo de mezcla) para la dotación óptima. Las variaciones mayores se producen entre 0 y 200 g/m<sup>2</sup>. Apenas mejora un 5 % al pasar de 200 a 500 g/m<sup>2</sup>, y la disminución es mínima al pasar a 800 g/m<sup>2</sup>. Por tanto, un aumento de dotación de emulsión, con los problemas de puesta en obra que puede suponer, no mejora sustancialmente la adherencia.

Tabla 4. Porcentaje de resistencia a esfuerzo cortante respecto al valor máximo.

MACROTEXTUR	Máxima resistencia a MPa	Tipo de combinación	Valores medios de resistencia a esfuerzo cortante, en MPa, para las dotaciones objetivo, en g/cm <sup>2</sup> .				% resistencia alcanzado por la unión de las capas respecto al máximo			
			0	200	500	800	0	200	500	800
A	0,7	AC probeta- AC	0,9	1,1	1,2	1,2	57	69	74	73
			4	4	2	1	%	%	%	%
A	1,39	AC probeta- BBTM	0,7	0,8	0,9	0,9	55	63	66	68
			7	7	2	4	%	%	%	%
A	0,82	AC testigo- AC	0,5	0,9	1,0	1,0	35	58	64	66
			8	5	6	9	%	%	%	%
A	2,65	AC testigo- BBTM	0,3	0,7	0,8	0,7	26	55	58	57
			6	7	1	9	%	%	%	%
A	1,9	BBTM probeta- BBTM	0,8	0,9	0,9		59	66	71	65
			2	2	8	0,9	%	%	%	%
A	2,65	BBTM testigo- BBTM	0,6	0,7	0,8	0,8	46	57	61	60
			4	9	5	3	%	%	%	%

**4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA OBTENER LAS TENSIONES TANGENCIALES ENTRE CAPAS DE FIRME**

**4.1. Definición geométrica**

Se han realizado tres modelos para las distintas posibilidades de unión entre una capa semidensa y una capa discontinua. En cuanto a los espesores de cada una de ellas, y para quedarnos del lado de la seguridad, se ha optado por 4 cm para la mezcla semidensa y de 3 cm para la discontinua. En cuanto a la unión entre capas, y también para conseguir las máximas tensiones tangenciales, se ha considerado compatibilidad de deformaciones por lo que no puede haber ningún movimiento entre ambas capas.



**4.2. Definición de los materiales**

Los dos tipos de mezclas bituminosas se han caracterizado por su módulo de elasticidad y su coeficiente Poisson y para lo obtención de los resultados que se indicaran en el último apartado se han considerado los siguientes valores:

- Mezcla semidensa: Módulo de elasticidad: 6.000 MPa y Coeficiente de Poisson: 0.33.
- Mezcla discontinua: Módulo de elasticidad: 4.000 MPa y Coeficiente de Poisson: 0.35.

**4.3. Definición de las cargas aplicadas y resultados**

Las cargas introducidas en el modelo han sido las indicadas en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11), ya que son cargas mayores que las indicadas en la normativa de dimensionamiento de firmes, y de esta forma obtendremos mayores tensiones tangenciales.

Se han considerado las cargas verticales debidas al tráfico de vehículos, tanto la carga distribuida como la carga puntual del vehículo pesado y las cargas horizontales debidas al frenado y arranque

de los vehículos y las debidas al derrape por el frenado.

A continuación se muestran los resultados de las tensiones tangenciales obtenidas entre las capas en los tres modelos que se han definido en el primer apartado:

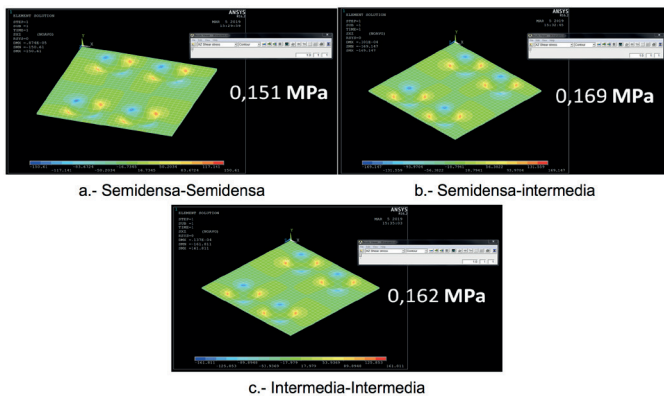


Figura 10. Resultados de las tensiones tangenciales entre diferentes capas de firme.

## 5. CONCLUSIONES

Con la realización de ejercicios interlaboratorio con los dos dispositivos de corte se ha establecido que la precisión es comparable (en torno al 15% en términos de coeficiente de variación de reproducibilidad para resistencia a esfuerzo cortante), pero se han detectado diferencias significativas en los valores medios. Estas diferencias se han mostrado también en los testigos extraídos en los tramos de experimentación y en los ensayos para determinar dotaciones óptimas. Las diferencias varían con el tipo de mezcla, pero siempre se obtienen valores medios entre un 15 - 35% más bajos con el dispositivo B.

En cuanto a la influencia de la macrotextura de las capas bituminosas a adherir, se observa una tendencia a valores más altos a macrotexturas bajas, tanto en resistencia a esfuerzo cortante como en términos de energía, con influencia tanto de la macrotextura de la capa soporte como de la superior. Sin embargo, no se puede establecer una correlación univariante dotación-macrotextura porque también influyen otros factores: estado y dotación del ligante en la capa a tratar, pulimento de los áridos, etc.

Se han obtenido, para todo tipo de mezclas, dotaciones óptimas en torno a 500 - 600 g/m<sup>2</sup>. Un exceso de ligante puede reducir la adherencia, por un efecto de lubricación de las capas. También se observa que, a partir de 200 g/m<sup>2</sup> ya se alcanzan valores próximos al óptimo, que es de media el 66% del valor máximo (entre el 58-74 % para los diferentes tipos de combinaciones de mezclas).

El modelo de incrementos finitos conduce a valores de resistencia a esfuerzo cortante inferiores a 0.2 MPa, por debajo de las especificaciones actuales del PG-3.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes.** Artículo 531. Orden FOM/2523/2014.
- **NLT-382/08.** Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte.
- **prEN 12697-48.** Bituminous mixtures. Test method for hot mix asphalt. Part 48. Interlaying bonding.
- **NLT-161/98.** Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de todos los miembros del grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS (Asociación de Laboratorios de Ensayo de ASEFMA): CEDEX, Laboratorio General de la Diputación Foral de Alava, Universidad Politécnica de Cataluña, Ciesm Intevia, Eiffage Infraestructuras, Pavalas, Sorigue, Cepsa, Probisa, Campezo, Universidad de Alicante, Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia, Laboratorio de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Murcia, Centro Regional de Control de Calidad de la Junta de Castilla y León.