

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

**METODOLOGIA PARA LA
CARACTERIZACION DE LIGANTES
ASFALTICOS MEDIANTE EL EMPLEO
DEL ENSAYO CANTABRO**

Autor: Jorge-Rodrigo Miro Recasens
Director: Felix Edmundo Perez Jimenez

Barcelona, marzo de 1994

Capítulo 5

APLICACION DEL ENSAYO CANTABRO A LA CARACTERIZACION DE LIGANTES ASFALTICOS: METODO UCL

1. OBJETO DEL TRABAJO DESARROLLADO

El objeto de este trabajo es comprobar la validez del ensayo cántabro de pérdida por desgaste en la valoración de las propiedades fundamentales de los ligantes, para establecer un método completo de caracterización que tenga en cuenta directamente esas propiedades, valorando el comportamiento del ligante como parte integrante de la mezcla.

Estas propiedades son:

- Cohesión
- Susceptibilidad térmica
- Adhesividad árido-ligante
- Envejecimiento
- Características del mástico filler-betún.

Este estudio tiene como finalidad determinar si el ensayo es suficientemente sensible para diferenciar el comportamiento de distintos ligantes, especialmente el de los ligantes modificados.

Cohesión

La misión del ligante bituminoso es aglomerar los distintos elementos del árido, proporcionando cohesión a la mezcla. Esta propiedad fundamental del ligante no es valorada, en general, por los ensayos convencionales de caracterización de ligantes.

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste fue desarrollado como un procedimiento para valorar, precisamente, la cohesión de las mezclas abiertas, por lo que la determinación de las pérdidas por desgaste, en determinadas condiciones, permitirá valorar la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla.

Susceptibilidad térmica

Los ligantes bituminosos se caracterizan por tener un comportamiento frágil a bajas temperaturas, un comportamiento elasto-plástico a temperaturas medias y un comportamiento inconsistente a temperaturas altas, figura 5.1.

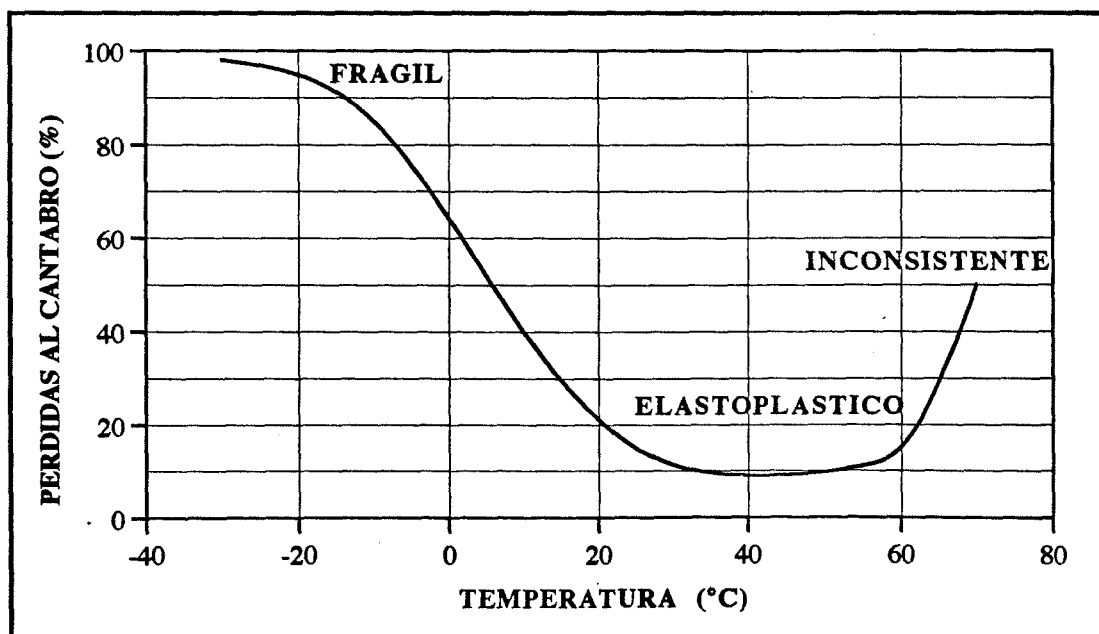


Figura 5.1. Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos (curva de estado)

Esta variación del comportamiento del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del ensayo cántabro de pérdida por desgaste. La determinación, en condiciones especiales, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, pone de manifiesto el comportamiento frágil del ligante, altas pérdidas al cántabro, su comportamiento elasto-plástico, pérdidas bajas al cántabro, y su inconsistencia, fuerte incremento de las pérdidas.

Mediante la determinación de la curva pérdidas al cántabro-temperatura (curva de estado) se puede evaluar la susceptibilidad térmica de un ligante y comprobar su comportamiento, diferenciando el comportamiento de los betunes modificados.

Adhesividad árido-ligante

El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dando cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua. Por efecto del agua, el ligante se separa del árido y disminuye así la cohesión de la mezcla.

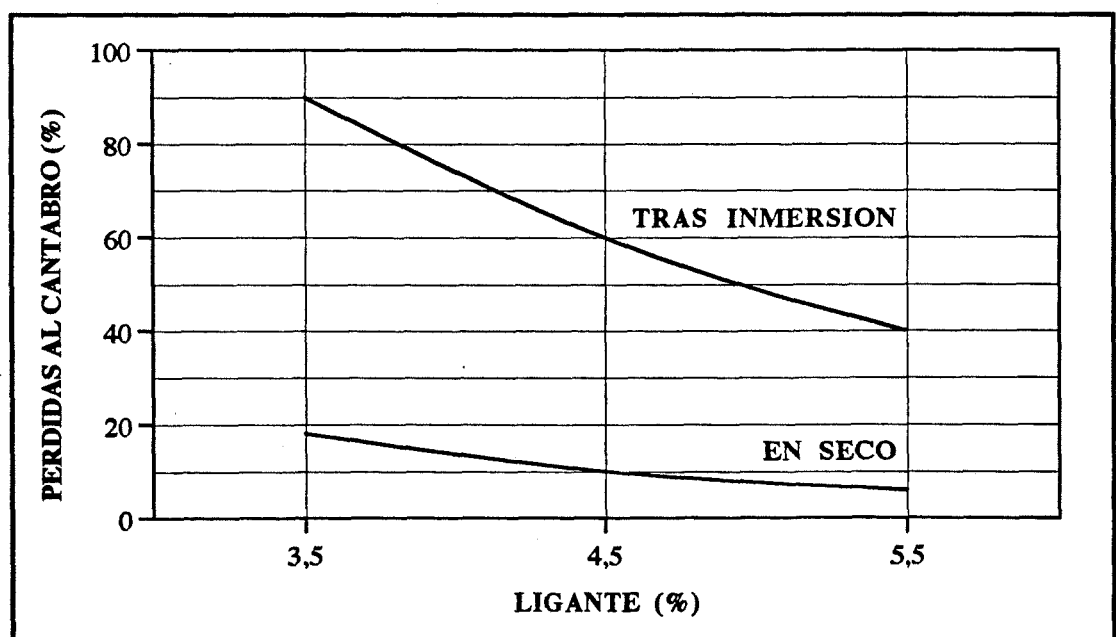


Figura 5.2. Evaluación de la adhesividad árido-ligante. Pérdidas al cántabro en seco y tras inmersión

Mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste se puede valorar la adhesividad árido-ligante, determinando las pérdidas de la mezcla cuando ésta se ensaya en seco o tras permanecer cierto tiempo sumergida en agua. El incremento de las pérdidas, figura 5.2, está directamente relacionado con la mejor o peor adhesividad del ligante al árido.

Envejecimiento

La resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos por la acción de los rayos ultravioletas y los agentes atmosféricos -aire, calor, agua, etc.- es una propiedad de los ligantes relacionada muy directamente con su durabilidad. Cuanto más rápida sea esta oxidación y envejecimiento, mayor será la rapidez con la que el ligante se volverá frágil, disminuyendo su resistencia a la acción abrasiva del tráfico.

Este efecto de envejecimiento se puede simular y acelerar en el laboratorio y mediante el ensayo cántabro evaluar como dicho proceso va afectando a las características del ligante. Se obtiene así una curva pérdidas al cántabro-tiempo de envejecimiento, claramente relacionada con el endurecimiento del ligante, figura 5.3.

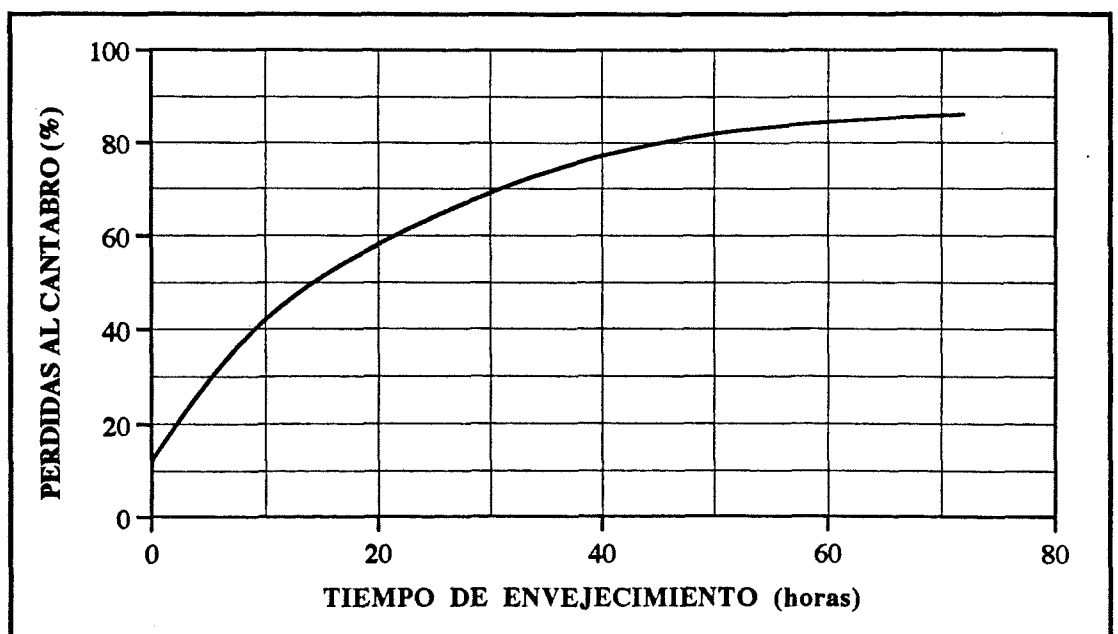


Figura 5.3. Curva de envejecimiento

Características del mástico fíller-betún

El efecto del fíller sobre el comportamiento del ligante puede ser también evaluado mediante el ensayo cántabro, determinando las pérdidas a distintas temperaturas para diferentes relaciones de fíller/betún y poder así comprobar el efecto beneficioso que puede tener el empleo de fílleres especiales o, incluso, la incorporación de fibras.

Mediante la determinación de las pérdidas en seco y tras inmersión, puede también determinarse el empleo de fílleres hidrófilos cuya presencia produce la rápida desenvuelta de la mezcla en presencia de agua.

2. ADAPTACION DEL ENSAYO

Como ya se ha comentado, el ensayo cántabro de pérdida por desgaste fue desarrollado como un procedimiento para valorar en laboratorio la cohesión de las mezclas abiertas. Esta cohesión es proporcionada a la mezcla fundamentalmente por la capa continua de ligante que envuelve todas y cada una de sus partículas. No obstante, hay otros factores y propiedades, tanto del árido como del ligante, que también influyen en la pérdida por desgaste. Estos factores son:

- Porcentaje de árido fino.
- Granulometría del árido fino.
- Tipo y naturaleza del árido fino.
- Porcentaje de fíller.
- Tipo y naturaleza de fíller.
- Granulometría del árido grueso.
- Tipo y naturaleza del árido grueso.
- Porcentaje de ligante.
- Tipo y naturaleza del ligante.
- Temperatura de ensayo.

Los cinco primeros factores pueden ser eliminados si se ensayan probetas fabricadas únicamente con el árido grueso y ligante.

La influencia de la granulometría, tipo y naturaleza del árido grueso, porcentaje de ligante y temperatura de ensayo puede ser eliminada si se mantienen constantes durante todo el proceso, quedando como única variable el tipo y naturaleza del ligante, de la que dependerán las propiedades de la mezcla.

Por lo tanto, si comparamos los resultados obtenidos en la medida de la resistencia al desgaste de probetas, fabricadas con el mismo tipo de mezcla, utilizando distintos tipos de ligante, la diferencia observada será únicamente debida a las diferentes características de cada uno de los ligantes.

En primer lugar se ha fijado el tipo, naturaleza y composición granulométrica del árido grueso con objeto de no introducir estas variables en el estudio.

Se ha utilizado árido granítico para los tamaños comprendidos entre 5 y 12,5 mm y calizo para los menores de 5 mm, separados ambos en fracciones que se mezclarán en las siguientes proporciones:

Tamiz UNE	% Pasa
12,5	100
10	82
5	38
2,5	6
0,63	0

Las características de los áridos utilizados están recogidas en la tabla 5.1. La densidad relativa de la composición granulométrica, determinada mediante aceite de parafina según la NLT 167/74, es de 2,671 g/cm³.

Tabla 5.1. Características de los áridos utilizados

CARACTERISTICAS	TIPO DE ARIDO	
	5 / 12	0 / 5
Naturaleza	Granítico	Calizo
Procedencia	BERTA	UNILAND
Desgaste Los Angeles (%)	24	27
Indice de Agujas (%)	33	-
Indice de Lajas (%)	17	-
Equivalente de arena	-	63

La curva granulométrica seleccionada se puede ver en la figura 5.4. Esta granulometría no tiene prácticamente finos ya que únicamente un 6% pasa por el tamiz 2,5 UNE y el tamiz 0,63 retiene todo el árido. La elección de una u otra granulometría no tiene especial relevancia ya que se mantendrá constante durante todo el estudio. Sin embargo, esta curva corresponde al límite inferior del huso de las mezclas porosas, con objeto de conseguir una mezcla muy abierta en la que su comportamiento se deba casi exclusivamente al ligante utilizado.

Se han utilizado cinco tipos de ligante, los mismos durante todo el estudio: tres betunes de penetración, B-60/70, B-80/100 y B-150/200, y dos betunes modificados mediante la incorporación de elastómeros, de diferentes procedencias; el primero con SBS (estireno-butadieno-estireno) y el segundo con EVA (etileno-acetato de vinilo), a los que denominaremos B-Pol.1 y B-Pol.2 respectivamente, cuyas características están recogidas, junto con las de los betunes de penetración, en la tabla 5.2.

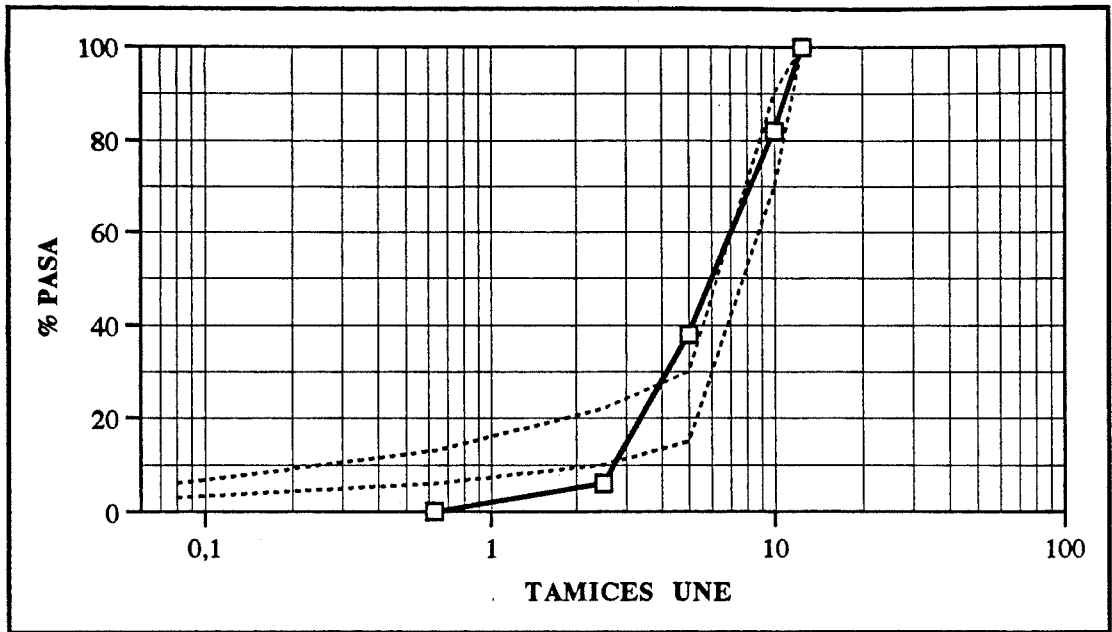


Figura 5.4. Curva granulométrica seleccionada

Tabla 5.2. Características de los ligantes utilizados

CARACTERISTICAS	TIPO DE LIGANTE				
	B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
Penetración, a 25 °C (0,1 mm)	65	105	195	69	69
Punto de reblandecimiento Anillo y Bola (°C)	48,1	43,3	40,1	50,7	59,1
Indice de penetración	-1,1	-1,2	-0,1	-0,2	1,7
Densidad relativa, a 25 °C (g/cm ³)	1,054	1,029	1,003	1,028	1,021

3. APLICACION A LA MEDIDA DE LA COHESION

Con objeto de comprobar la validez del ensayo cántabro de pérdida por desgaste en la valoración de la cohesión de los ligantes bituminosos, se aplicó éste en el estudio de la cohesión de los cinco ligantes de trabajo.

Con cada tipo de ligante, manteniendo constante el porcentaje utilizado -4,5% s.a.- se fabricaron series de 18 probetas, que se agruparon en 6 grupos de 3 probetas cada uno, compactadas en la compactadora Marshall, empleando 50 golpes por cara, con la particularidad de colocar en cada cara un papel de filtro para conseguir una buena textura y un buen acabado en la probeta, ya que su falta produce pérdidas de material en las bases debido a que éste se queda adherido en la maza de la compactadora.

Una vez desmoldadas las probetas, se determinó su densidad y contenido de huecos a partir de la medida geométrica de su volumen y la densidad relativa de los materiales, según la norma NLT-168. Los resultados, recogidos en la tabla 5.3, ponen de manifiesto la escasa dispersión que se obtuvo en la fabricación de las probetas de cada serie, con coeficientes de variación para el porcentaje de huecos en mezcla comprendidos entre 0,015 y 0,037.

Tabla 5.3. Características de las probetas fabricadas (4,5% de ligante)

CARACTERISTICAS	TIPO DE LIGANTE				
	B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
Densidad (g/cm ³)	1,947	1,961	1,948	1,956	1,977
Desviación típica	0,0098	0,0079	0,0129	0,0127	0,0106
Coefficiente de variación	0,0050	0,0040	0,0066	0,0101	0,0054
Huecos en mezcla (%)	22,3	21,5	21,8	21,7	20,8
Desviación típica	0,3907	0,3201	0,5250	0,7997	0,4374
Coefficiente de variación	0,0175	0,0149	0,0241	0,0369	0,0210

El valor medio del porcentaje de huecos en mezcla obtenido para los betunes de penetración es del 21,9%, oscilando entre 21,5 y 22,3%, esto es, $\pm 0,4$ puntos, mientras que para los betunes modificados es ligeramente inferior: 21,3% ($\pm 0,4$). Esta escasa variación del contenido de huecos en mezcla, dentro de cada tipo de betún, no tendrá prácticamente influencia sobre las pérdidas por desgaste obtenidas para cada tipo de ligante..

Un grupo de 3 probetas se ensayó a 25 ± 1 °C, a 100, 200 y 300 revoluciones, después de mantenerlas durante 12 horas a la temperatura de ensayo. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Pérdidas al cántabro a 25 °C

REVOLUCIONES (Nº)	TIPO DE LIGANTE				
	B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
100	5,1	4,8	2,6	2,1	4,2
200	10,3	9,7	5,6	4,9	8,2
300	16,5	12,4	10,2	9,9	13,8

En la figura 5.5 se representan las pérdidas por desgaste obtenidas para cada uno de los ligantes ensayados en función del número de revoluciones del tambor.

Obviamente, al aumentar la severidad del ensayo -número de revoluciones- las pérdidas aumentan para todos los tipos de ligante ensayados, un aumento que, en general, es más acusado al pasar de 200 a 300 revoluciones. Este hecho podría ser significativo si el valor de las pérdidas fuese elevado, ya que a 300 vueltas podríamos perder sensibilidad en el ensayo, obteniendo pérdidas del 100% para cualquier ligante. Aunque éste no es el caso, se deberá tener presente para posteriores ensayos.

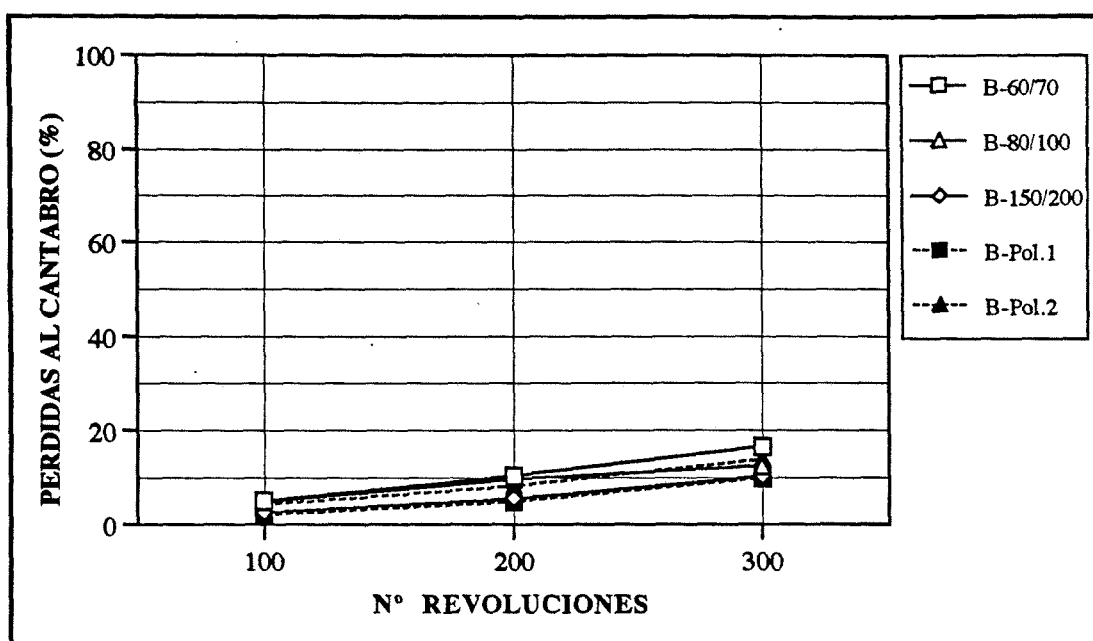


Figura 5.5. Efecto del tipo de ligante y severidad del ensayo sobre las pérdidas por desgaste a 25 °C

Para esta temperatura, 25 °C, todos los betunes ensayados presentan pérdidas por desgaste relativamente bajas (< 20%) por lo que, para comparar su comportamiento, podemos fijarnos en el valor de las pérdidas a 300 revoluciones.

Entre los betunes de penetración, el B-60/70 presenta mayores pérdidas (16,5%) que el B-80/100 (12,4%), y éste a su vez, mayores que el B-150/200 (10,2%). Esto parece lógico si se tiene en cuenta que cuanto más blando sea un betún, más capacidad tendrá para absorber energía en el momento del impacto, presentando menores pérdidas que un betún más duro que, debido a su mayor rigidez, será menos deformable y romperá en el momento del impacto. Por ello, la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla, a 25 °C, aumenta a medida que el betún es más blando.

Respecto a los betunes modificados, el B-Pol.1 presenta menores pérdidas que el B-Pol.2, menores incluso que cualquiera de los betunes de penetración.

No obstante, al comparar la cohesión de los distintos betunes ensayados, es preciso tener en cuenta que la variación de la porosidad podría tener influencia sobre las pérdidas obtenidas. A nivel individual, la máxima variación del contenido de huecos en mezcla se registra entre el B-60/70, con un 22,3%, y el B-Pol.2, con un 20,8%, esto es, una variación de 1,5 puntos, suficiente para influir en las pérdidas. Como además, el valor de las pérdidas a 25 °C para cada uno de los ligantes ensayados se mantiene dentro de un intervalo relativamente pequeño (entre 9,9 y 16,5%, a 300 revoluciones), no es posible establecer comportamientos claramente diferenciados. Mayor sentido puede tener el estudio de la cohesión a diferentes temperaturas.

4. APLICACION A LA MEDIDA DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA

Si evaluamos la cohesión que un determinado ligante proporciona a una mezcla mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste, las pérdidas obtenidas dependerán de la temperatura a la que se realice el ensayo. La mayor o menor susceptibilidad térmica de un ligante hará que al variar la temperatura de ensayo obtengamos mayores o menores pérdidas, consecuencia de la mayor o menor cohesión que el ligante proporciona a la mezcla.

Esta idea nos indica la posibilidad de aplicar el ensayo cántabro de pérdida por desgaste para evaluar la variación del comportamiento del ligante con la temperatura, esto es, para valorar su susceptibilidad térmica.

Como es bien conocido, los ligantes bituminosos son materiales termoplásticos que presentan un intervalo de plasticidad reducido, comportándose a bajas temperaturas como productos frágiles y quebradizos, y a temperaturas moderadamente elevadas como productos viscosos.

Además de las propiedades plásticas, los ligantes bituminosos, dependiendo de su grado de peptización, presentan cierta elasticidad, relativamente pequeña en los betunes tipo sol y algo más pronunciada en los tipo gel. A temperaturas moderadamente elevadas esta elasticidad prácticamente desaparece, y el betún se deforma permanentemente y fluye.

Por lo tanto, al variar la temperatura, un mismo betún presenta características asimilables a las de un cuerpo frágil, elasto-plástico o viscoso. Esta variación del estado del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

Las series de probetas fabricadas con cada tipo de ligante (4,5% s.a.) se habían agrupado en 6 grupos de 3 probetas cada uno. Cada grupo de probetas se mantuvo durante 12 horas a las temperaturas de -30, -10, 10, 25, 40 y 60 °C respectivamente. Inmediatamente, se ensayaron a 100, 200 y 300 revoluciones, manteniendo la temperatura de la cámara donde se encuentra el tambor a 25 °C.

Las condiciones del laboratorio no permitían realizar el ensayo a las distintas temperaturas fijadas en el estudio, ya que el motor de la máquina de Los Angeles no podría funcionar a las temperaturas extremas. Por ello, se decidió mantener la temperatura de ensayo en 25 °C, temperatura habitual para el ensayo cántabro de pérdida por desgaste. Ello implica que la temperatura de la probeta no se mantenga constante durante el tiempo de ejecución del ensayo; No obstante, al mantenerse constantes las condiciones de ensayo, todas las probetas de un mismo grupo sufrirían la misma variación de temperatura, que no se considera excesiva dada la relativa rapidez del ensayo (10 minutos aproximadamente).

La tabla 5.5 recoge los valores obtenidos, según el procedimiento desarrollado, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas para cada uno de los ligantes ensayados.

Tabla 5.5. Pérdidas al cántabro a distintas temperaturas y diferentes grados de severidad del ensayo (100, 200 y 300 revoluciones)

REVOL. (Nº)	TEMP. (°C)	TIPO DE LIGANTE				
		B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
100	-30	73,2	96,7	44,2	19,8	24,8
	-10	30,1	34,6	30,0	20,4	17,5
	10	21,8	21,5	13,6	12,3	11,2
	25	5,1	4,8	2,6	2,1	4,2
	40	2,2	1,3	3,0	1,0	1,2
	60	4,8	4,3	100	1,4	3,3
200	-30	100	100	74,5	40,5	44,9
	-10	74,2	76,7	53,7	37,7	35,6
	10	47,7	47,8	28,9	21,6	20,6
	25	10,3	9,7	5,6	4,9	8,2
	40	7,4	4,1	6,5	3,8	4,4
	60	11,0	24,9	100	4,0	7,1
300	-30	100	100	85,4	52,8	58,1
	-10	90,0	87,2	61,6	47,2	48,7
	10	61,3	62,4	39,4	31,2	31,7
	25	16,5	12,4	10,2	9,9	13,8
	40	12,6	8,8	13,3	6,9	9,1
	60	14,5	33,6	100	7,7	12,7

Si representamos las pérdidas obtenidas a distintas temperaturas para uno de los ligantes ensayados -el B-80/100, por ejemplo-, figura 5.6, podremos observar la variación del estado del ligante con la temperatura: a bajas temperaturas se obtienen elevadas pérdidas, que ponen de manifiesto el comportamiento frágil del ligante; a

medida que aumenta la temperatura las pérdidas van disminuyendo hasta alcanzar un mínimo -comportamiento elastoplástico- a partir del cual se produce un incremento de las pérdidas (que puede llegar a ser muy acusado para betunes muy blandos), debido al comportamiento inconsistente del ligante a altas temperaturas.

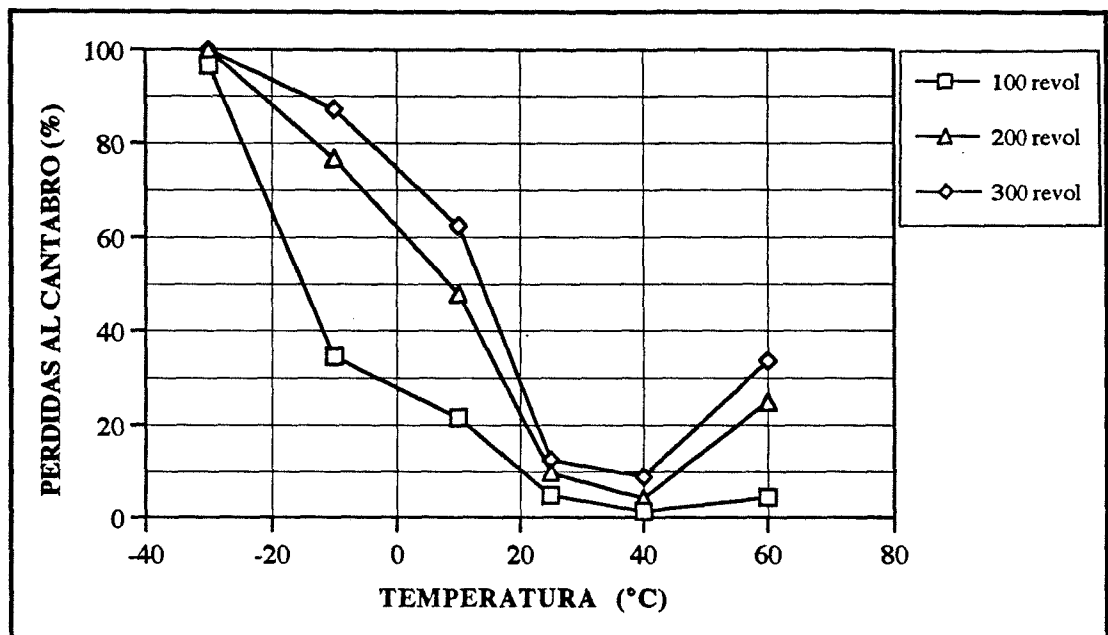


Figura 5.6. Efecto de la temperatura sobre las pérdidas por desgaste para diferentes grados de severidad del ensayo. B-80/100.

Mediante esta **curva de estado** podemos evaluar la susceptibilidad térmica del ligante: cuanto más tendida sea la curva, menos susceptible será el ligante, y cuanto más cóncava, más susceptible.

En la figura 5.6 también puede observarse el efecto del número de revoluciones del tambor: cuanto mayor es la severidad del ensayo, las pérdidas son más elevadas y se obtienen curvas más altas, que para las temperaturas más bajas tienden a superponerse.

Esto quiere decir, como se ha indicado anteriormente, que si el valor de las pérdidas obtenidas es elevado, podríamos perder la capacidad para diferenciar distintos comportamientos si el número de revoluciones del ensayo es elevado. En tal caso, se representarán las pérdidas por desgaste de los distintos ligantes a 100 revoluciones, para visualizar mejor esta diferencia de comportamientos.

Una variación en el contenido de huecos en mezcla obtenido podría desplazar ligeramente la curva de estado hacia arriba o hacia abajo, aunque no modificaría su curvatura, por lo que es posible despreciar la influencia de la porosidad al comparar el comportamiento de los diferentes ligantes ensayados.

La figura 5.7 muestra las curvas de estado, a 300 revoluciones, para cada uno de los ligantes ensayados. Para los betunes de penetración, B-60/70, B-80/100 y B-150/200 se obtienen unas elevadas pérdidas a bajas temperaturas, más acusadas en los betunes más duros, llegando a ser del 100% a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ para los dos primeros, lo que refleja su comportamiento más frágil. Estas pérdidas van disminuyendo a medida que aumenta la temperatura, hasta alcanzar valores mínimos entre 25 y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, rango en el que se pone de manifiesto el comportamiento elastoplástico del ligante.

A partir de aquí, se produce un incremento de las pérdidas a medida que aumenta la temperatura -comportamiento inconsistente-, tanto más acusado cuanto más blando sea el betún. El comportamiento de los betunes más duros, B-60/70 y B-80/100, es muy similar en todo el rango de temperaturas, salvo a partir de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde el B-80/100 alcanza su punto de reblandecimiento y se muestra más inconsistente que el B-60/70 (que tiene una temperatura de reblandecimiento superior). Esta inconsistencia es aún más acusada para el B-150/200, aunque éste último es menos susceptible a bajas temperaturas.

Para estos ligantes, se obtienen unas curvas de estado con fuertes pendientes y marcada concavidad, que tienden a girar en sentido antihorario a medida que aumenta la penetración del ligante, esto es, la rama frágil se vuelve más tendida mientras que la rama inconsistente es más acusada.

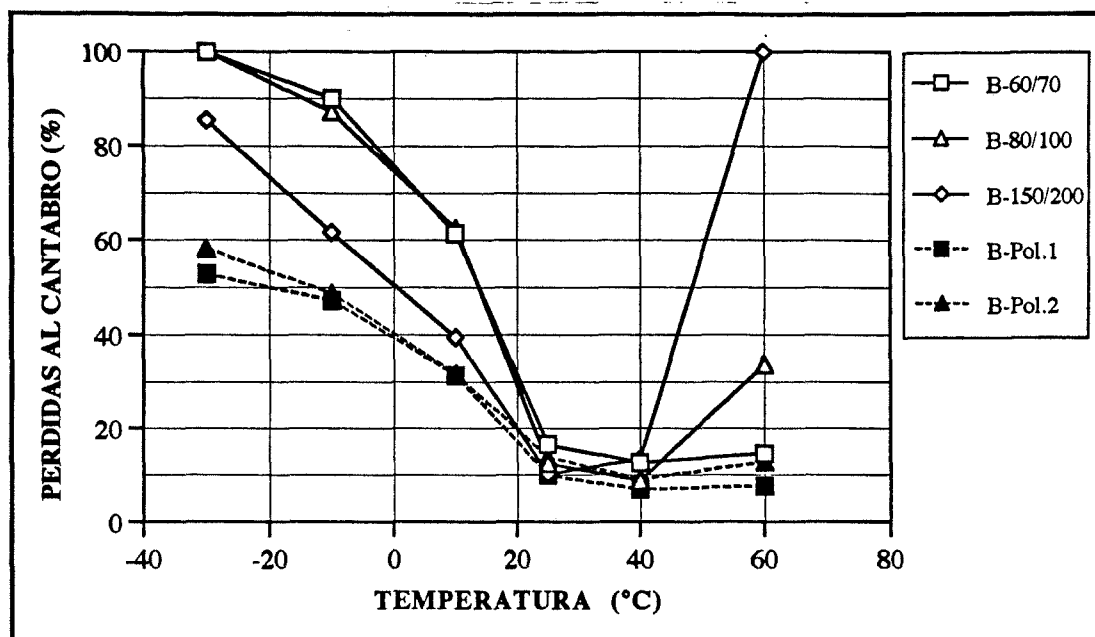


Figura 5.7. Efecto de la temperatura sobre las pérdidas por desgaste a 300 revoluciones

En cambio, para los ligantes modificados se obtienen curvas de estado que, aún presentando la misma forma, son mucho más tendidas y se sitúan por debajo de las correspondientes a los betunes de penetración, esto es, presentan una menor susceptibilidad térmica. Aunque el comportamiento de ambos betunes es muy similar, el B-Pol.1 es menos susceptible que el B-Pol.2.

Aunque en este caso el comportamiento inconsistente de los betunes ha quedado claramente diferenciado a la temperatura de 60 °C, especialmente el de los betunes de penetración, el ensayo carece de sentido a temperaturas elevadas, ya que a estas temperaturas las probetas son muy deformables y, salvo que la inconsistencia del ligante llegue a producir su desmoronamiento, se produce un efecto de amasado en el que los áridos que pueden desprenderse en un impacto, se vuelven a unir a la probeta

en el siguiente impacto, sin reflejar ningún incremento de las pérdidas por desgaste, cuando sería lógico esperarlo. Por ello, si se quiere evaluar correctamente el cambio de comportamiento elasto-plástico a comportamiento inconsistente, deberá fraccionarse más el intervalo de temperaturas entre 40 y 70 °C, con objeto de obtener una mejor definición de la curva de estado en esta zona, complementándose con una inspección visual de la consistencia de las probetas.

5. APLICACION A LA MEDIDA DE LA ADHESIVIDAD ARIDO-LIGANTE

Para conseguir una adecuada resistencia al desgaste es condición necesaria una buena adherencia del ligante al árido. Pero la pérdida por desgaste no depende únicamente de la adherencia árido-ligante, sino que influyen otras propiedades del ligante: consistencia, fragilidad, viscosidad, etc. y del árido: forma, textura, dureza, etc. Por ello, resulta difícil la aplicación del ensayo cántabro de pérdida por desgaste a la valoración de la adhesión mecánica del ligante al árido. Pero donde si puede tener aplicación es en la medida de la adhesividad, adhesión del ligante al árido en presencia de agua.

Si comparamos los resultados obtenidos en la medida de la resistencia al desgaste de probetas mantenidas al aire frente a otro grupo de probetas, fabricadas con el mismo tipo de mezcla, pero que han sido mantenidas en agua durante un cierto tiempo antes del ensayo, la diferencia observada será únicamente debida al efecto de desenvuelta producido por el agua. Es decir, el aumento de la pérdida por desgaste estará relacionado con la adhesividad del ligante al árido.

Este es el procedimiento general empleado por los ensayos denominados mecánicos en la valoración de la adhesividad. Pero a diferencia de estos ensayos, el procedimiento aquí expuesto tiene la ventaja de poder eliminar del ensayo otros factores que también influyen sobre la resistencia conservada y que en ningún caso eran eliminados en los anteriores. Nos referimos al efecto del filler y del árido fino.

Al poder eliminar totalmente la presencia de finos y fíller en la fabricación de la mezcla, la pérdida de resistencia al desgaste estaría relacionada única y exclusivamente con la adhesividad del ligante a las partículas del árido.

Pero la adhesividad no es una propiedad exclusiva del ligante bituminoso, sino que depende del conjunto árido-ligante: un mismo ligante presentará buena o mala adhesividad según el tipo o condiciones del árido que se utilice. Por eso, para estudiar correctamente la adhesividad de un ligante hay que considerar el árido que se utilizará en realidad.

Dado que el objetivo de este trabajo no es evaluar el problema de la adhesividad de una determinada combinación de árido y ligante, sino comprobar la sensibilidad del ensayo para medir diferentes adhesividades, se seguirá utilizando el mismo tipo, naturaleza y granulometría del árido. Por tanto, los valores obtenidos serán válidos para esa combinación de árido-ligante, entendiéndose que los mismos ligantes frente a otro tipo de áridos, podrán dar valores distintos, sin que pueda establecerse ninguna correlación.

Mayor importancia tiene el establecer las condiciones de inmersión de las probetas en agua y las condiciones y procedimiento para su ensayo. El proceso de desvuelta del árido por la acción del agua es tanto más importante cuanto mayor sea la temperatura de ésta y más largo sea el periodo de inmersión de las probetas. Por otra parte, la temperatura del agua no puede ser muy elevada puesto que, si se sobrepasa el punto de reblandecimiento de los ligantes, se produciría el desmoronamiento de las probetas. Por estas dos razones, se decidió fijar la temperatura de ensayo en 35 °C y mantener sumergidas las probetas durante 4 días.

Aunque respecto a las condiciones de inmersión utilizadas habitualmente en el ensayo sobre mezclas (1 día a 60 °C), la menor temperatura aquí utilizada se ve compensada por una mayor duración del periodo de inmersión, estas condiciones no son tan duras como las primeras, lo que permite realizar el ensayo sin problemas, aún cuando los ligantes no contengan carga mineral, como es el caso.

A continuación de este periodo de inmersión en agua, las probetas permanecen secándose al aire, a la temperatura de 25 °C durante un día, y son ensayadas a 100, 200 y 300 revoluciones a esa misma temperatura.

Como resultado del ensayo se presenta el aumento de la pérdida por desgaste referido a probetas fabricadas con la misma mezcla y ensayadas en seco a 25 °C, a 100, 200 y 300 revoluciones.

De las 6 probetas fabricadas para cada tipo de ligante, 3 eran ensayadas directamente, después de mantenerlas durante 12 horas a 25 °C, y el resto eran ensayadas después de haberlas tenido sumergidas 4 días en agua a 35 °C y 1 día secándose al aire a 25 °C.

Los resultados obtenidos en el ensayo aparecen en la tabla 5.6. En la figura 5.8 se representan las pérdidas en seco y tras inmersión obtenidas, para cada uno de los ligantes ensayados, en función del número de revoluciones del tambor.

Tabla 5.6. Pérdidas al cántabro en seco y tras inmersión a 100, 200 y 300 revoluciones

REVOL. (Nº)	CONDICIONES DE ENSAYO	TIPO DE LIGANTE				
		B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
100	En seco	5,1	4,8	2,6	2,1	4,2
	Tras inmersión	84,8	59,3	96,0	65,3	49,4
200	En seco	10,3	9,7	5,6	4,9	8,2
	Tras inmersión	96,8	89,8	100	95,0	86,0
300	En seco	16,5	12,4	10,2	9,9	13,8
	Tras inmersión	100	100	100	100	97,9

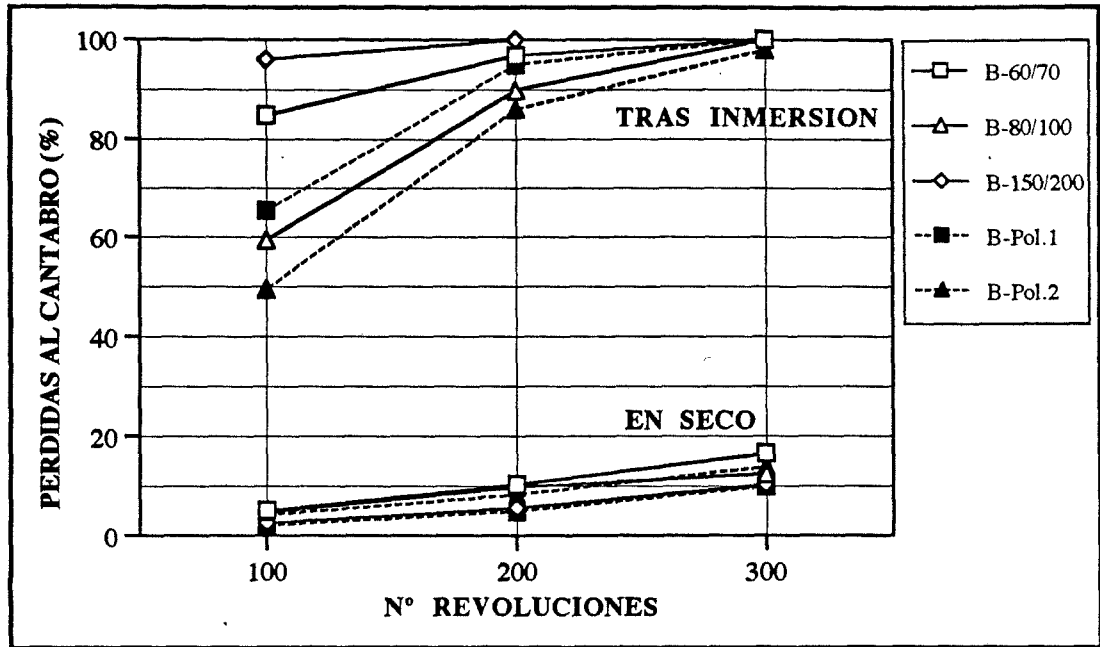


Figura 5.8. Efecto del tipo de ligante y severidad del ensayo sobre las pérdidas en seco y tras inmersión

En primer lugar, se observa un fuerte incremento de las pérdidas tras inmersión, superiores al 50%, para todos los ligantes ensayados, que pone de manifiesto una pobre adhesividad generalizada frente al árido utilizado.

También se observa que al aumentar la severidad del ensayo -número de revoluciones- las pérdidas tras inmersión aumentan rápidamente, alcanzando el 100% a 300 revoluciones para prácticamente todos los ligantes.

En cambio, para un menor grado de severidad, el ensayo se muestra suficientemente sensible para diferenciar el comportamiento de los diferentes ligantes. La figura 5.9 muestra las pérdidas en seco y tras inmersión obtenidas a 100 revoluciones.

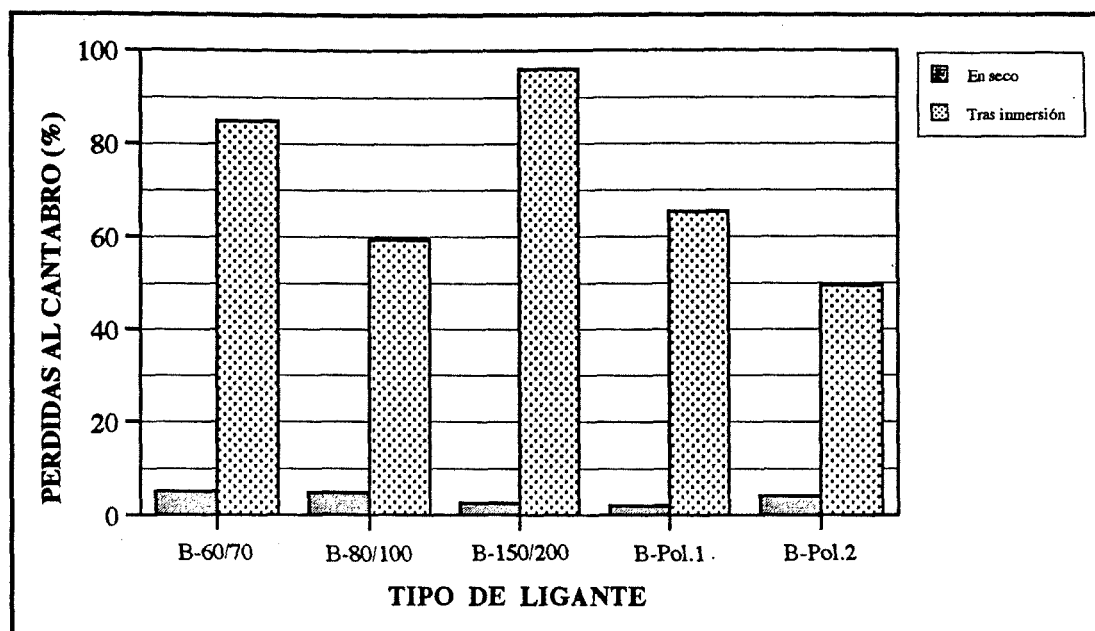


Figura 5.9. Efecto del agua sobre las pérdidas por desgaste a 25°C. 100 revoluciones

Como ya se ha indicado, al evaluar la adhesividad de los ligantes mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste, estamos evaluando su adhesividad frente al tipo de árido utilizado en la mezcla; por tanto, al hablar de mejor o peor adhesividad de uno de los ligantes ensayados, nos referimos a la combinación árido-ligante utilizada.

Entre los betunes de penetración, pese a la baja adhesividad que presentan, el mejor es el B-80/100, seguido del B-60/70 y, finalmente, el B-150/200, con un 59.3, 84.8 y 96.0% de pérdidas tras inmersión respectivamente.

Por otra parte, el B-Pol.2, con unas pérdidas tras inmersión del 49,4% -el único que no supera el nivel del 50%- presenta mejor adhesividad que el B-Pol.1 y mejor también que los betunes de penetración.

Recuérdese que el ligante menos susceptible a la temperatura era el B-Pol.1, y que el B-150/200 presentaba mejor cohesión a bajas temperaturas que cualquiera de los otros betunes de penetración; sin embargo, son precisamente estos ligantes los que presentan peor adhesividad, dentro de su correspondiente grupo.

Por tanto, es imposible hablar del “mejor” ligante en términos absolutos, ya que algunas de sus propiedades están contrapuestas. Se trata pues de llegar a una solución de compromiso para escoger el ligante que mejor se adapte a las necesidades específicas que se requieran en cada caso.

6. APLICACION A LA MEDIDA DEL ENVEJECIMIENTO

El envejecimiento es un fenómeno complejo, en el cual existe una degradación y transformación de los componentes iniciales de cada ligante, perdiendo éstos sus propiedades, en el que influyen mucho las acciones, individuales o superpuestas, de los rayos ultravioletas del sol, el agua de lluvia, el calor, el aire, etc.

Esta evolución se inicia con las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de mezcla, y progresa por las reacciones de oxidación, deshidrogenización y volatilización que se producen durante su vida de servicio.

Los ensayos más habituales utilizados en laboratorio para valorar el envejecimiento de los ligantes bituminosos (TFOT o RTFOT), se basan en someter al ligante a unas condiciones similares a las del proceso de fabricación y determinar los cambios experimentados en sus propiedades físicas mediante los ensayos convencionales, que muchas veces no permiten evaluarlas con suficiente precisión.

La aplicación del ensayo cántabro de pérdida por desgaste se lleva a cabo sobre probetas de mezcla, en las que, por tanto, el ligante ya ha estado sometido a las condiciones de mezclado, esto es, valora las propiedades que éste proporciona a la mezcla una vez que ha sido incorporado a ella.

Además, cuando el betún se incorpora a la mezcla, envuelve de manera uniforme las partículas de árido, uniéndolas entre sí, esto es, constituye una película fina, que debido a la porosidad de la mezcla (21% aprox.) presenta una gran superficie expuesta al aire.

Por tanto, si sometemos las probetas a ciertas condiciones de envejecimiento acelerado, en realidad estaremos sometiendo el ligante a un envejecimiento en película fina; la oxidación y endurecimiento del ligante, harán que se vuelva frágil, disminuyendo la resistencia a la disgregación de la mezcla. Entonces, la determinación de las pérdidas al cántabro puede poner de manifiesto la mayor o menor sensibilidad de los ligantes frente al fenómeno de envejecimiento.

Al mantener constante la granulometría del árido, las mezclas fabricadas con cada tipo de ligante presentarán una porosidad similar y por tanto una superficie expuesta al envejecimiento también similar.

Otra de las variables que puede influir en el proceso de envejecimiento es el porcentaje de ligante de la mezcla ya que a mayor contenido, no sólo obtendríamos una película de mayor espesor (más difícil de envejecer), sino también un menor contenido de huecos y por tanto una menor superficie expuesta a las acciones externas.

Como nuestro objetivo es comprobar la validez del ensayo como método para evaluar el envejecimiento, podemos seguir manteniendo constante el contenido de ligante, lo que nos permitirá comparar las pérdidas obtenidas con cada uno de los diferentes tipos ensayados, más que determinar, en términos absolutos, el envejecimiento de un ligante en una mezcla determinada.

Las condiciones a las que deben someterse las probetas para simular un proceso de envejecimiento acelerado pueden ser muy variadas: radiación ultravioleta, humedad, ciclos de frío y calor, etc. No obstante, se trata de fijar unas condiciones, capaces de envejecer suficientemente los ligantes, que sean fácilmente reproducibles en cualquier laboratorio.

A la vista de los medios disponibles en nuestro laboratorio y de los mecanismos que producen el envejecimiento de los betunes, las condiciones de envejecimiento establecidas han sido mantener las probetas a una cierta temperatura en una estufa de aire forzado durante diversos periodos de tiempo, para conseguir diferentes grados de envejecimiento. Era necesario fijar esa temperatura de forma que el envejecimiento fuese gradual y que se pudiera realizar en laboratorio en un tiempo no demasiado largo.

Pérez González [99] evaluó la evolución de las características del residuo de película fina, una vez eliminada la costra o *nata* formada en la superficie de la película. Esta evolución era, a 60 °C, demasiado lenta para obtener en laboratorio diferentes grados de envejecimiento en tiempos razonables; para la temperatura de 100 °C el envejecimiento obtenido fue más gradual para esos mismos tiempos de permanencia en estufa, y muy rápido a 163 °C, observándose un envejecimiento muy notable a partir de los 3 días en estufa, tabla 5.7.

No obstante, a juicio del autor, el tiempo de envejecimiento a 60 y 100 °C es excesivamente grande para un ensayo en laboratorio, siendo preferible la temperatura de 163 °C, fraccionando más los períodos de envejecimiento. Por una parte, la temperatura de 163 °C es la misma que la establecida en los ensayos habituales de envejecimiento en película fina; por otra, la circulación de aire caliente en el interior de la estufa garantiza que el envejecimiento se produzca de forma homogénea sobre la totalidad de la superficie expuesta del ligante (incluso en los poros interiores, siempre que estén comunicados).

Dada la elevada temperatura a que estarán sometidas las probetas, muy por encima del punto de reblandecimiento de los ligantes, podría producirse el desmoronamiento de las mismas en el interior de la estufa, siendo imposible proceder a su ensayo. Por ello, se pensó en confinar lateralmente las probetas mediante una tela metálica, con tamaño de malla suficientemente grande para permitir la circulación del aire caliente y suficientemente pequeño para evitar las posibles pérdidas de material.

Tabla 5.7. Evolución de las características de tres betunes B-60/70 en película fina tras envejecimiento en estufa a 60, 100 y 163 °C (Pérez González, 1993)

Temperatura (°C)	Tiempo en estufa (días)	CARACTERISTICAS			
		Penetración (0,1 mm)	Pto. reblan. (°C)	IP	Ductilidad (cm)
163	0	67	48,8	-0,8	>100
	5 horas	52	51	-0,9	>100
	1	35	58,2	-0,2	>100
	2	24	65,6	0,4	42
	3	17	72,8	0,9	7
	4	12	81	1,4	4
	5	9	89	1,9	1
	6	12	86	2,0	3,5
	7	11	91	2,4	3,5
	8	12	86	2,0	3,5
100	0	60	50,6	-0,6	>100
	6	32	58,4	-0,3	56
	15	15	75,0	1,0	4
	30	8	87,4	1,5	1,5
60	0	65	50,6	-0,4	>100
	3	53	52,0	-0,6	>100
	6	51	52,0	-0,7	>100
	17	45	53,0	-0,7	>100

Con objeto de comprobar la eficacia de este confinamiento, se fabricó una serie de prueba de 3 probetas y se mantuvo durante 72 horas a la temperatura de 163 °C. Tras este periodo, las probetas se dejaron enfriar y se ensayaron a 25 °C después de mantenerlas durante 12 horas a la temperatura de ensayo.

Una vez ensayadas las probetas se observó que éstas no adquirían una forma esférica -como cabría esperar- sino que adquirían una forma cónica, cuya base correspondía a la cara inferior de la probeta mientras ésta permanecía en la estufa para su envejecimiento.

Esto demostraba que durante el envejecimiento, dada la elevada temperatura a que estaban sometidas las probetas, se producía un cierto escurrimiento del ligante, que se acumulaba en la zona inferior de la probeta, creándose, una vez enfriada la probeta, una zona con un mayor contenido de ligante, que presentaba una mayor resistencia a la disgregación que el resto de la probeta, falseando los resultados obtenidos.

Para evitar este problema, se ideó un dispositivo, constituido por unas bases perforadas y unos pernos de sujeción, que permitían dar la vuelta manualmente a la probeta cada cierto intervalo de tiempo, sin presionarla directamente; cada 2,5 horas se invertía la posición de la probeta, invirtiendo por tanto el sentido del escurrimiento que pudiera producirse, evitando así tanto la acumulación de ligante en una única zona de la probeta, como la posible pérdida de material.

La existencia de esta operación manual cada 2,5 horas hizo necesario el fraccionamiento del periodo de envejecimiento en función de las horas de trabajo: las probetas se mantenían en estufa durante periodos de 10 horas cada día, asegurando que previamente se hubiera alcanzado la temperatura de 163 °C.

Con cada tipo de ligante, se fabricaron series de 15 probetas que se agruparon en 5 grupos de 3 probetas cada uno. El primer grupo se reservó sin someterlo a ningún periodo de envejecimiento (0 horas), con el fin de disponer de una muestra sometida únicamente a las condiciones del proceso de mezcla. Los cuatro restantes

permanecieron durante 5, 20, 40 y 72 horas respectivamente a la temperatura de 163 °C. Finalizado el periodo de envejecimiento, las probetas se dejaban enfriar, se extraían los dispositivos de sujeción y confinamiento, y se ensayaban a 25 ± 1 °C, a 100, 200 y 300 revoluciones, después de mantenerlas durante 12 horas a la temperatura de ensayo.

Los valores de densidad y contenido de huecos obtenidos, tabla 5.8, prácticamente no difieren de los obtenidos en anteriores series, tanto en la escasa dispersión conseguida en la fabricación de las probetas de cada serie, con coeficientes de variación para el porcentaje de huecos en mezcla comprendidos entre 0,016 y 0,025, como en la variación de la porosidad entre cada una de las series, que como máximo llega a ser de 1,5 puntos entre el B-60/70 y el B-150/200, con 22,2 y 20,7% respectivamente.

Por tanto, cabe esperar que el efecto del envejecimiento sea más acusado que el posible efecto de la variación de porosidad, por lo que, al evaluar el comportamiento de los diferentes ligantes ensayados, no se considerará la influencia de ésta última variable. Los resultados obtenidos están recogidos en la tabla 5.9.

Tabla 5.8. Características de las probetas fabricadas (4,5% de ligante)

CARACTERISTICAS	TIPO DE LIGANTE				
	B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
Densidad (g/cm ³)	1,950	1,972	1,977	1,965	1,977
Desviación típica	0,0137	0,0103	0,0104	0,0087	0,0108
Coefficiente de variación	0,0070	0,0052	0,0053	0,0044	0,0054
Huecos en mezcla (%)	22,2	21,1	20,7	21,4	20,8
Desviación típica	0,5473	0,4134	0,4211	0,3400	0,4451
Coefficiente de variación	0,0247	0,0196	0,0203	0,0159	0,0214

Tabla 5.9. Pérdidas al cántabro para distintos grados de envejecimiento a 163 °C, a 100, 200 y 300 revoluciones.

REVOL. (Nº)	TIEMPO DE ENVEJEC. (horas)	TIPO DE LIGANTE				
		B-60/70	B-80/100	B-150/200	B-Pol.1	B-Pol.2
100	0	5,1	4,8	2,6	2,1	4,2
	5	8,9	6,9	9,0	3,6	8,3
	20	15,8	14,2	10,4	11,7	15,3
	40	28,9	26,9	21,7	20,4	26,9
	72	47,1	40,0	33,2	20,3	25,2
200	0	10,3	9,7	5,6	4,9	8,2
	5	19,3	15,4	16,3	8,2	16,8
	20	35,4	27,2	19,0	23,6	38,6
	40	62,9	57,5	45,7	41,0	57,2
	72	91,9	82,8	70,5	56,6	64,6
300	0	16,5	12,4	10,2	9,9	13,8
	5	31,7	27,8	25,1	14,2	29,6
	20	54,6	48,2	35,9	33,4	58,1
	40	87,0	78,2	62,4	58,4	78,0
	72	100	93,9	88,9	77,7	83,4

En primer lugar, se analizará el comportamiento de los betunes de penetración. Para cualquier tiempo de envejecimiento, los betunes más duros presentan mayores pérdidas al cántabro -y por tanto mayor envejecimiento- que los betunes más blandos. Obviamente, el mayor contenido de aceites y volátiles de éstos últimos hace que el envejecimiento se produzca más lentamente. Así para cualquier grado de envejecimiento que fijemos, el betún B-150/200 tarda el doble de tiempo en alcanzarlo que el betún B-60/70.

Por otra parte, todas las curvas de envejecimiento de los betunes de penetración tienen la misma forma y presentan unas pendientes más fuertes a corto plazo -del 3,1% en media-, que se suavizan para los tiempos de envejecimiento más largos -0,6%-, esto es, se produce un envejecimiento más rápido al inicio de su vida de servicio, que se "ralentiza" a más largo plazo, figura 5.10.

Esto se debe a que la pérdida de aceites y volátiles que se produce a medida que envejece el betún, se acusa mucho más a corto plazo, ya que a más largo plazo esta pérdida ya se ha producido y su efecto prácticamente desaparece.

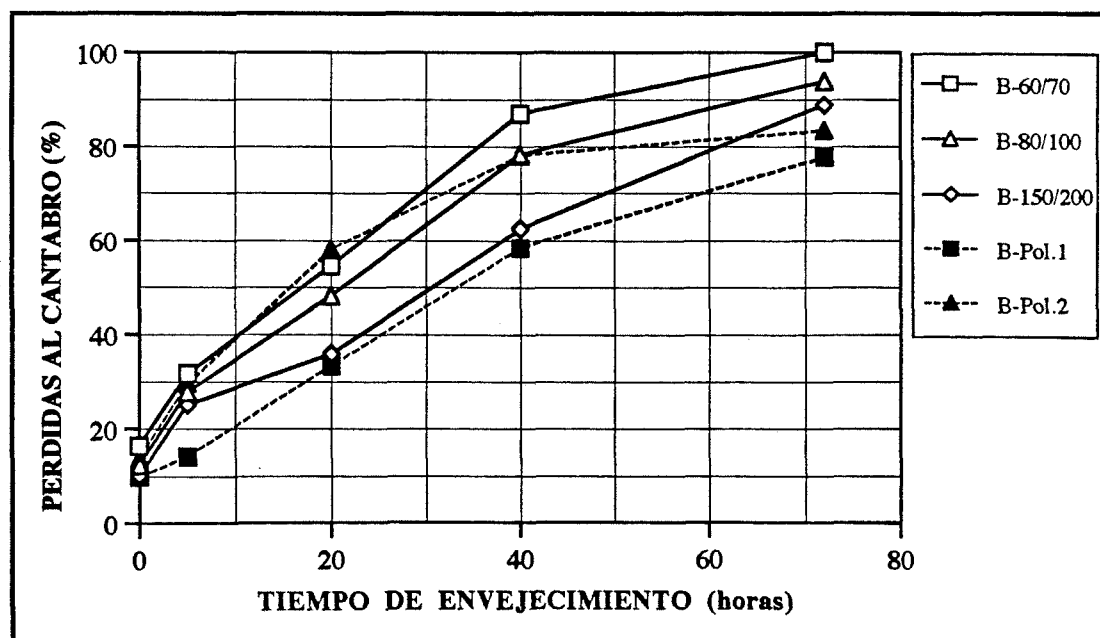


Figura 5.10. Efecto del grado de envejecimiento sobre las pérdidas por desgaste a 300 revoluciones para cada uno de los ligantes ensayados

Por su parte, los betunes modificados presentan comportamientos muy diferentes uno de otro. El B-Pol.1 (SBS) no sólo presenta unas menores pérdidas que el B-Pol.2 (EVA) a cualquier edad, sino que la evolución de las pérdidas con el tiempo de envejecimiento es prácticamente lineal, a diferencia del B-Pol.2 para el que las pérdidas aumentan muy rápidamente a corto plazo, y prácticamente se estabilizan a largo plazo.

Esto da idea del papel tan importante que desempeña el modificador del ligante en la evolución del envejecimiento, especialmente durante la primera mitad de su vida de servicio, ya que al final, cuando el ligante está muy envejecido, las curvas de envejecimiento convergen y el efecto del modificador desaparece: el comportamiento es prácticamente el mismo.

Esto pone de manifiesto que los dos betunes modificados ensayados han sido fabricados con un betún base similar, cuyo comportamiento es el que en realidad estamos evaluando para tiempos de envejecimientos muy grandes.

En relación con los betunes de penetración, el B-Pol.1 presenta una mayor resistencia al envejecimiento que cualquiera de ellos, aunque su comportamiento es similar al del B-150/200. En cambio, el B-Pol.2 presenta mayores pérdidas para tiempos de envejecimiento intermedios -a 20 horas presenta más pérdidas que cualquiera de los betunes de penetración (similares a las del B-60/70)- que tienden a estabilizarse para tiempos mayores: a 40 horas presenta el mismo grado de envejecimiento que el B-80/100, mientras que a 72 horas el grado de envejecimiento -que prácticamente no ha aumentado- es inferior que el de cualquiera de los otros tres.

Estas curvas pérdidas al cántabro-tiempo de envejecimiento están claramente relacionadas con la oxidación y endurecimiento del ligante. Para comprobar esta relación se recuperó el ligante de las probetas ensayadas para su posterior caracterización. El proceso de recuperación mediante destilador rotatorio, NLT-353/85, figura 5.11, de aplicación exclusiva a los betunes asfálticos, asegura una alteración mínima de sus propiedades.

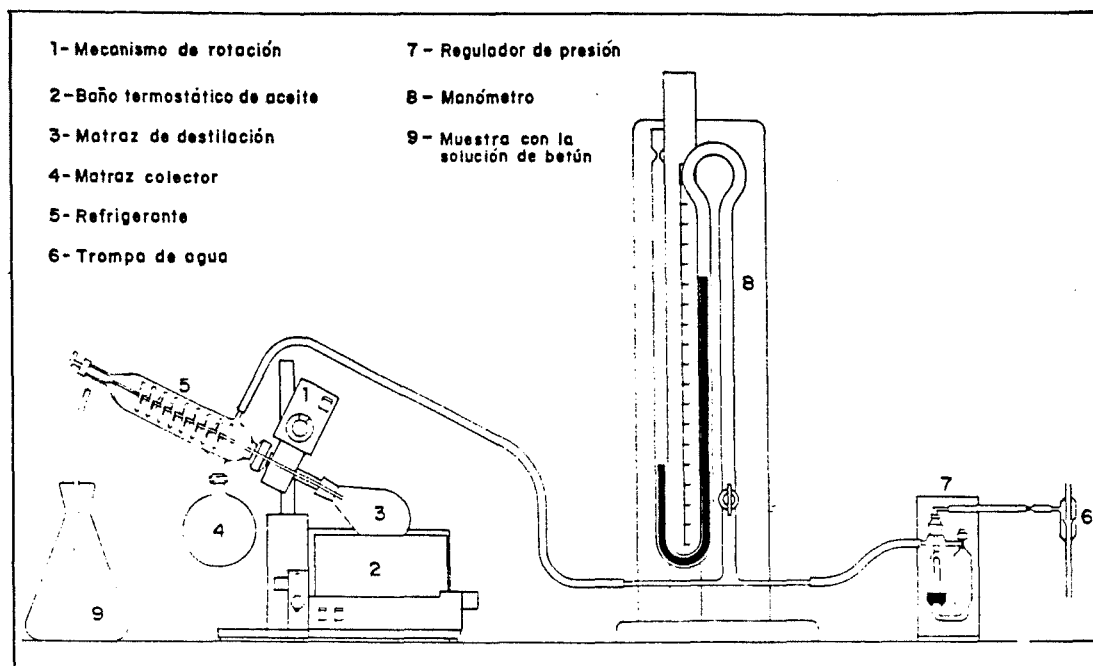


Figura 5.11. Esquema del aparato de destilación mediante destilador rotatorio

El ensayo es especialmente útil para conocer las alteraciones experimentadas por un ligante bituminoso tanto durante un proceso de mezclado en caliente como posteriormente a lo largo de la vida de servicio de una mezcla bituminosa.

El ligante se extrae de la mezcla por disolución en diclorometano. Después de separar la fracción mineral insoluble, la solución de betún se concentra por destilación y a presión reducida en un matraz en forma de pera, inclinado y rotatorio alrededor de su eje, lo que favorece la velocidad de evaporación del disolvente a causa de la gran superficie que adquiere la solución en estas condiciones.

Terminada la destilación y restablecida en el aparato la presión atmosférica, manteniendo el matraz en caliente a la temperatura de vertido, se llenan los moldes, cajas o anillos necesarios para la realización de los ensayos de caracterización prescritos: penetración y punto de reblandecimiento, tabla 5.10.

Tabla 5.10. Evolución de las características de los ligantes ensayados con el tiempo de envejecimiento (163 °C)

TIPO DE LIGANTE	TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO (horas)	CARACTERISTICAS		
		Penetración (0,1 mm)	Pto. reblan. (°C)	IP
B-60/70	0	26	61,0	-0,2
	1	22	62,5	-0,2
	5	19	71,0	0,9
	20	10	94,0	2,6
	40	-	-	-
	72	-	-	-
B-80/100	0	-	-	-
	1	41	50,0	-1,6
	5	18	63,0	-0,5
	20	11	81,0	1,3
	40	10	80,0	1,0
	72	-	-	-
B-150/200	0	106	46,0	-0,3
	1	79	47,0	-0,9
	5	51	54,0	-0,2
	20	17	87,5	2,9
	40	12	-	-
	72	-	-	-
B-Pol.1	0	32	57,0	-0,6
	1	28	63,0	-0,3
	5	24	67,0	0,7
	20	17	86,0	2,7
	40	13	84,0	2,0
	72	7	-	-
B-Pol.2	0	37	62,0	0,7
	1	34	65,0	1,1
	5	26	74,0	1,9
	20	18	91,0	3,4
	40	-	-	-
	72	-	-	-

La variación de la penetración y el punto de reblandecimiento con el tiempo de envejecimiento está recogida en las figuras 5.12 y 5.13.

El envejecimiento de los ligantes queda constatado con la disminución de la penetración y el aumento del punto de reblandecimiento con el tiempo de envejecimiento, implicando unas mayores pérdidas al cántabro.

No ha llegado a establecerse una correlación directa entre estos parámetros y las pérdidas al cántabro, ya que, en algunos casos, la cantidad de ligante recuperado de las probetas ensayadas, especialmente el de las más envejecidas que presentaban pérdidas elevadas, fue inferior a la prescrita para el ensayo, pudiendo presentar los resultados cierta inexactitud. Por tanto, no podemos hablar de valores concretos, sino únicamente de la forma y tendencia de las curvas obtenidas.

La disminución de la penetración es muy rápida en los primeros momentos, estabilizándose relativamente (aunque sigue decreciendo) a partir de las 20 horas. En cambio, la evolución del punto de reblandecimiento es bastante lineal hasta las 20 horas, a partir del cual se estabiliza.

Comparando los valores obtenidos de estos dos parámetros, penetración y punto de reblandecimiento, a 0 horas con los valores de los betunes originales, podemos determinar el envejecimiento que se produce durante la fabricación de la mezcla. Así, para los betunes de penetración, B-60/70, B-80/100 y B-150/200, se produce una disminución de la penetración del 71, 67 y 49% respectivamente debido a la fabricación de la mezcla, mientras que para los betunes modificados, B-Pol.1 y B-Pol.2, esta disminución es del 55 y 62% respectivamente. Por su parte, el punto de reblandecimiento aumenta un 28, 19 y 13% respectivamente para los betunes de penetración, y un 18 y 9% respectivamente para los betunes modificados.

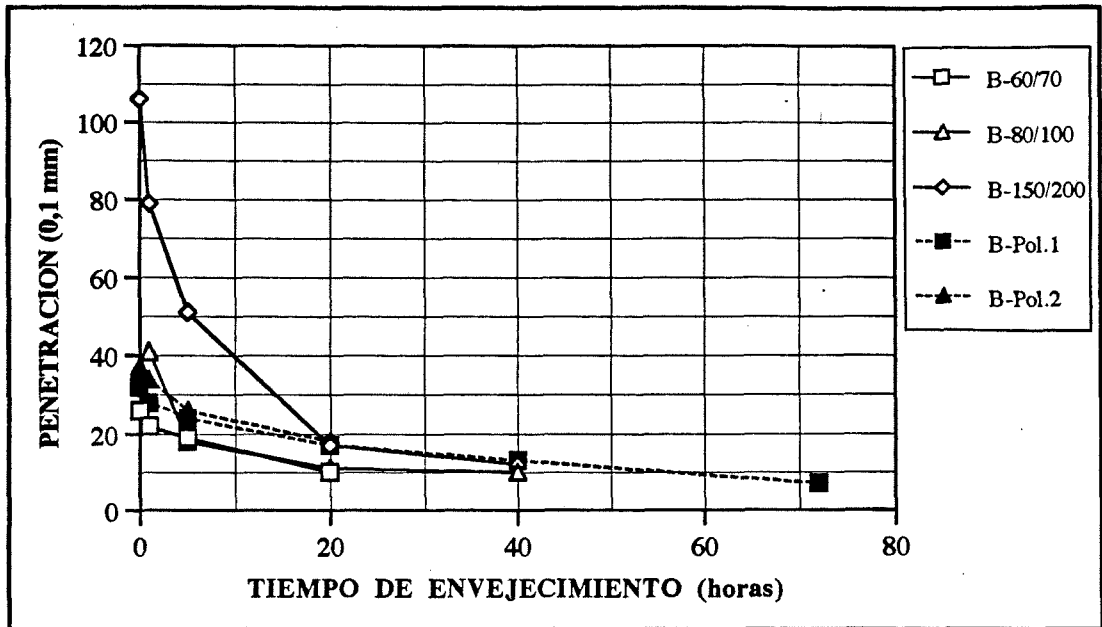


Figura 5.12. Evolución de la penetración con el tiempo de envejecimiento (163 °C)

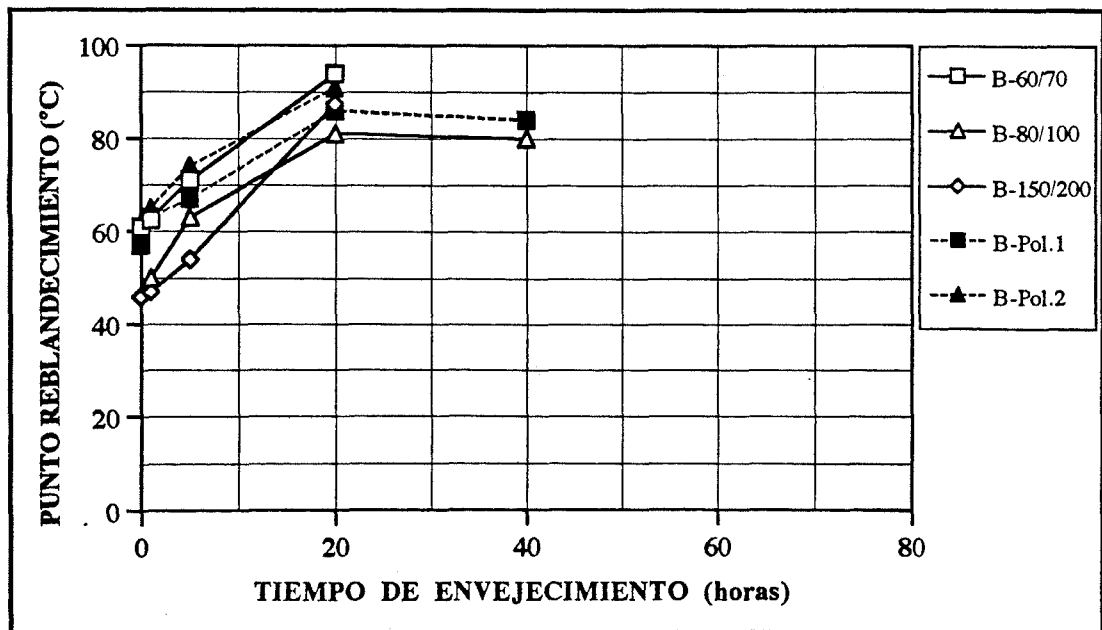


Figura 5.13. Evolución del punto de reblandecimiento con el tiempo de envejecimiento (163 °C)

En la figura 5.14 se ha superpuesto la evolución de la penetración con el tiempo de envejecimiento obtenida para el betún B-80/100 mediante el procedimiento desarrollado (UCL), con las obtenidas por Lee [80], para un betún de penetración similar envejecido, tanto en condiciones reales de servicio, como en laboratorio mediante el ensayo IDT (*Iowa Durability Test*).

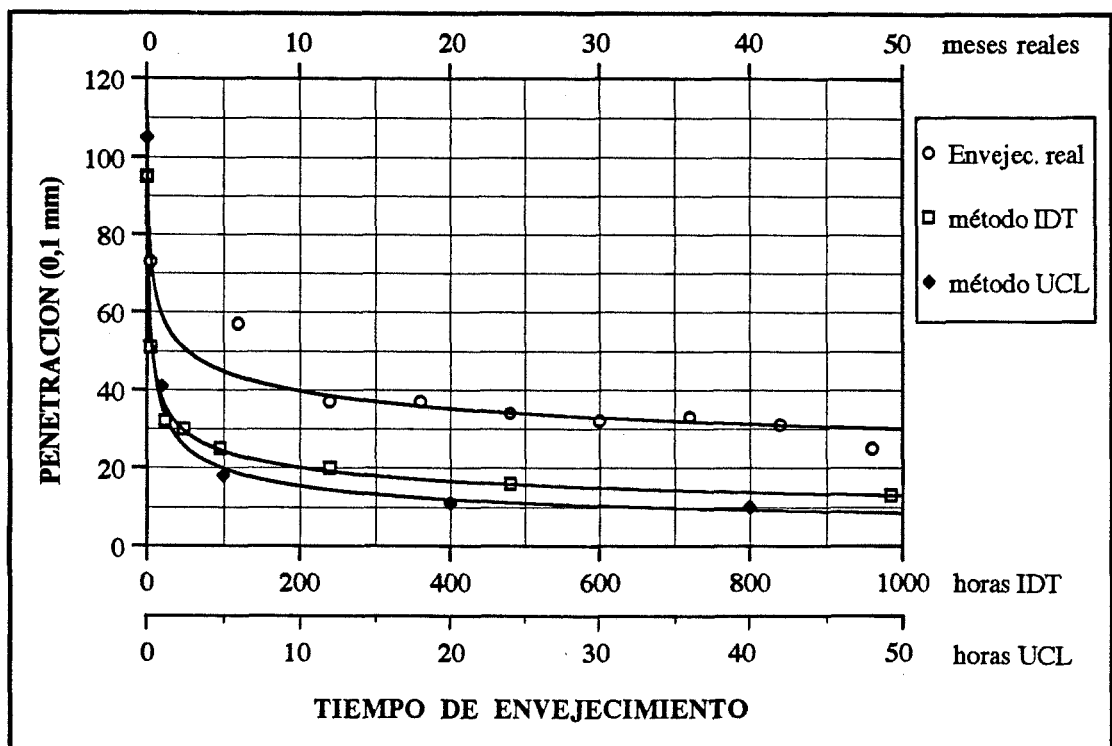


Figura 5.14. Evolución de la penetración con el tiempo de envejecimiento en condiciones reales de servicio y en laboratorio (métodos IDT y UCL)

Las tres curvas presentan la misma forma, y ponen de manifiesto que las condiciones de envejecimiento en laboratorio son más agresivas que las que se dan en la carretera, ya que, en ambos casos, se obtiene una mayor disminución de la penetración con el tiempo de envejecimiento. Por ello, es posible simular en laboratorio largos períodos de envejecimiento real en relativamente poco tiempo.

Lee ajustó esta evolución mediante un modelo hiperbólico, y comprobó que 46 horas de envejecimiento con el IDT equivalen a 60 meses de envejecimiento real para las condiciones de Iowa. En cambio, mediante el procedimiento desarrollado (UCL) se obtienen grados de envejecimiento superiores a los anteriores con sólo 5 horas de ensayo.

7. APLICACION A LA MEDIDA DE LAS CARACTERISTICAS DEL MASTICO FILLER-BETUN

Es evidente que las características del ligante tienen una gran influencia en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas, pero no es menor el efecto que tienen las propiedades del mástico que forman el filler y el ligante.

Cuando el filler se dispersa en un betún se forma un mástico que tiene una mayor consistencia y unas propiedades diferentes a las del ligante original, aumentando notablemente su viscosidad y tenacidad, figuras 5.15 y 5.16, y disminuyendo su susceptibilidad térmica.

Este cambio de las propiedades del betún tiene unos efectos muy favorables sobre las propiedades de la mezcla, mejora su estabilidad, su resistencia a la tracción, su resistencia al desgaste, etc., pudiendo tener también un efecto beneficioso sobre la adhesividad árido-ligante [103].

Además, cuando se incorpora filler a la mezcla, el espesor de película adherida a los áridos por fuerzas de cohesión será mayor que la que correspondería a sus características superficiales ya que se suman los efectos producidos por las partículas embebidas en el ligante, formando una película más consistente y aumentando más aún las fuerzas de cohesión entre los áridos. La cantidad de filler que puede incorporarse al ligante en forma activa depende del espesor de la película y de la granulometría del filler [88, 130].

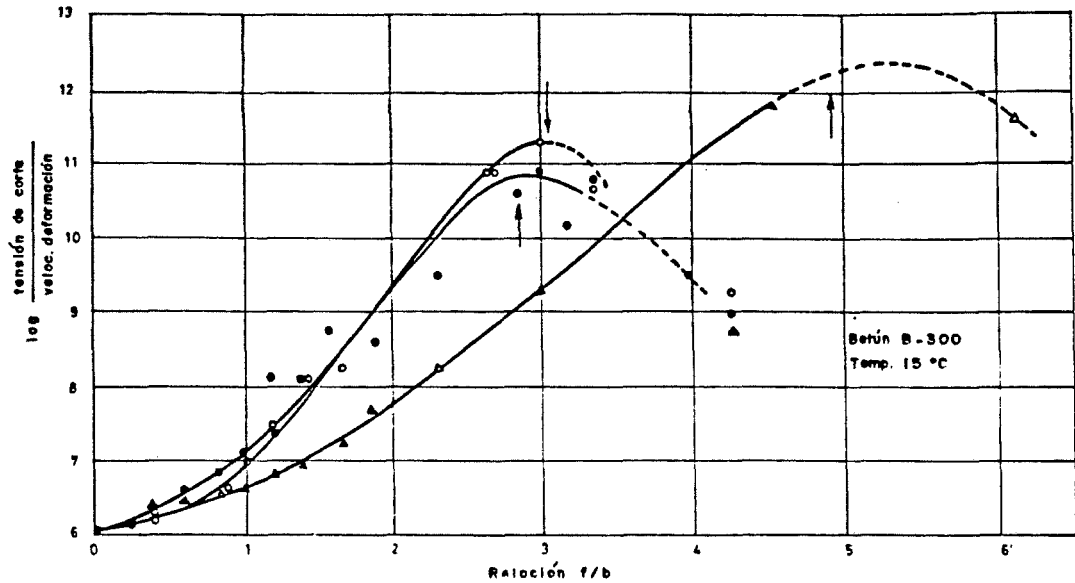


Figura 5.15. Efecto de la concentración de filler sobre la viscosidad de un betún (Rigden)

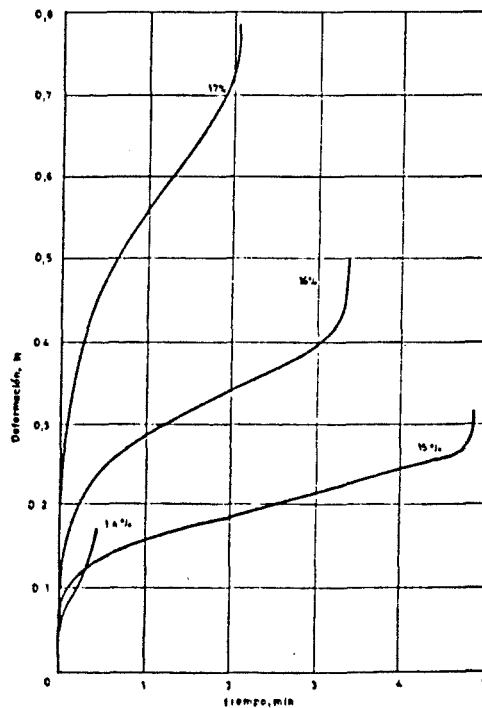


Figura 5.16. Curvas de fluencia mostrando el efecto del porcentaje de filler en la mezcla (Rigden)

Por tanto, una cierta proporción del fíller, principalmente las partículas más pequeñas que el espesor de la película de ligante, quedan embebidas en la masa de ligante, no pudiendo contribuir al relleno del esqueleto mineral más que de una forma aislada, sino que forman un mortero de características diferentes a las del ligante sólo, en forma de película sobre la superficie mineral, que modificará las características reológicas de la mezcla.

Por otra parte, diversos estudios han demostrado el hecho de que aumentando la proporción de fíller en una mezcla bituminosa se aumenta su estabilidad y resistencia mecánica pero hasta un cierto límite, ya que conforme aumenta el contenido de fíller, y dependiendo de sus características geométricas y composición mineralógica, la mezcla se va haciendo cada vez más seca y frágil, tendiendo a disgregarse durante su servicio.

Las características geométricas de las partículas del fíller -forma, angularidad y textura- actúan como “núcleos potenciales” para intensificar la superficie activa del fíller en la interfase fíller-betún. Cuantas más irregularidades geométricas posea el fíller -con idéntica composición mineralógica y relación fíller/betún-, los másticos alcanzan, para una temperatura dada, mayor consistencia, Ishai y Craus [65]. Este aumento de consistencia se debe a la mayor capacidad de absorción, lo que implica un descenso en el contenido de betún libre del mástico.

La composición mineralógica afecta especialmente a la adhesión. Al mezclar un fíller calizo con betún se produce una modificación de la adhesión mecánica, causada por el aumento de viscosidad del mástico. En cambio, si se incorporan fílleres como el cemento o la cal apagada, además de la adhesión mecánica anterior presentan otra de tipo físico-químico: la presencia de agua en la interfase árido-ligante provoca reacciones químicas con estos fílleres que renuevan la unión entre el árido y el ligante [64].

El efecto físico-químico de diferentes tipos de fíller en las propiedades mecánicas de la mezcla, se puso de manifiesto por Craus, Ishai y Sides [27], mediante el ensayo Marshall, utilizando un árido silíceo, un betún B-60/70 y tres tipos de fíller que representan un amplio rango de propiedades físico-químicas: esferas de vidrio, caliza y cal hidratada, figura 5.17.

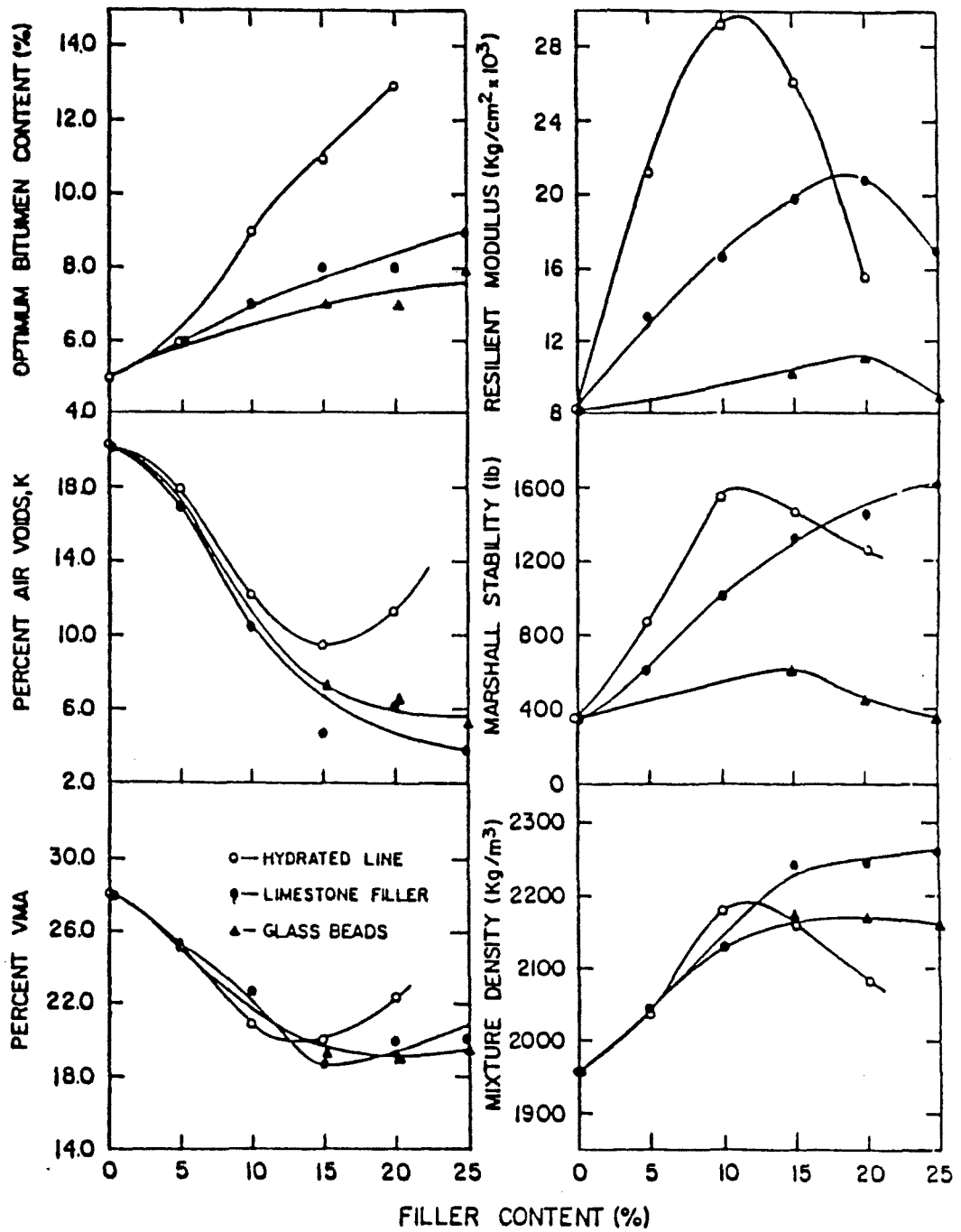


Figura 5.17. Propiedades mecánicas de las mezclas fabricadas con diferentes tipos y contenidos de filler (Craus, 1981)

Por una parte el aumento de la viscosidad del ligante hace que aumente la resistencia al desplazamiento de éste y por tanto su adhesividad. Por otra parte, debido a su finura, el fíller presenta una mayor actividad química frente al betún y al agua que las partículas del árido. Dependiendo que su atracción sea mayor hacia el betún o hacia el agua, se verá frenado o acelerado el proceso de desenvuelta [103].

La mayor o menor actividad hidrofílica del fíller suele estar unida a su grado de finura. Cuanto mayor es el grado de finura de un fíller mayor suele ser su actividad frente al agua. Por otra parte, una falta de finura del fíller hace que éste sea poco activo, tanto frente al betún como frente al agua. Es por ello que se suele tomar esta característica del fíller, o su valoración indirecta a través de su densidad aparente, como índice de su calidad. No obstante, la densidad aparente en tolueno no se relaciona muy bien con la superficie específica debido a la influencia de factores tales como la actividad, carga de partículas, etc. que pueden influir en el proceso de sedimentación. En la tabla 5.11 se recogen las especificaciones que normalmente se suelen emplear en la caracterización de filleres.

Tabla 5.11 . Prescripciones sobre filleres (MOPU, 1989)

CARACTERISTICAS	ESPECIFICACION
Densidad aparente en tolueno, NLT-176/74 (g/cm ³)	0,5 - 0,8
Coefficiente de emulsibilidad, NLT-180/74	< 0,6
Granulometría por tamizado, NLT-151/72 (% pasa)	
Tamiz UNE 0,63	100
Tamiz UNE 0,16	90 - 100
Tamiz UNE 0,080	75 - 100

Aunque existen otros ensayos para caracterizar fílleres [130]: densidad aparente en tolueno, huecos compactados en seco, análisis granulométrico, superficie específica, punto de reblandecimiento, equivalente de arena, coeficiente de actividad Lhorty, índice de plasticidad, coeficiente de emulsibilidad, inmersión-compresión, composición mineralógica por difracción de rayos X y microscopía electrónica, no existen ensayos que permitan valorar directamente las propiedades del mástico fíller-betún y su efecto sobre la cohesión de la mezcla.

El procedimiento desarrollado va dirigido a conocer el efecto del fíller sobre la cohesión, susceptibilidad térmica y adhesividad del ligante, y sobre todo, caracterizar fílleres no convencionales, como puede ser el caso de fibras.

El efecto de fílleres de distinta naturaleza sobre la adhesividad árido-ligante lo puso ya de manifiesto Pérez Jiménez [103], valorando el aumento de las pérdidas por desgaste tras inmersión de distintos tipos de mezclas bituminosas fabricadas con áridos calizos y ofíticos y fílleres de distinta procedencia y actividad, pudiendo detectar el empleo de fílleres hidrófilos, cuya presencia produce la rápida desenvuelta de la mezcla en presencia del agua.

Interesa ahora comprobar la validez del ensayo para evaluar el efecto de la incorporación de fíller sobre la cohesión y susceptibilidad térmica del ligante. Para ello, se ha seleccionado un fíller tipo, cuyas características se recogen en la tabla 5.12, que se incorporará a la mezcla de trabajo en contenidos crecientes para obtener distintas relaciones fíller/betún, determinándose a continuación las pérdidas por desgaste a diferentes temperaturas.

Para cada tipo de ligante ensayado, se han fabricado 3 series de 18 probetas, utilizando relaciones de fíller/betún de 0; 0,5 y 1 respectivamente, y una serie adicional, con relación fíller/betún igual a 1, en la que se ha sustituido un porcentaje de fíller -0,5%- por fibra acrílica. Únicamente se han utilizado dos de los cinco tipos de ligante disponibles: un betún de penetración, B-60/70, y un ligante modificado con SBS, B-Pol.1, con un contenido de ligante en ambos casos del 4,5% s.a. (excepto fíller).

Tabla 5.12. Características del fíller utilizado

CARACTERISTICAS	FILLER
Naturaleza	Calcita cristalina molida
Procedencia	Arbós (Tarragona)
Peso específico, DIN 53193 (g/cm ³)	2,7
Densidad aparente, DIN 53194 A (g/cm ³)	1,5
Granulometría por sedimentación, ASTM 152 H (% pasa)	
100 µm	100
80 µm	99
40 µm	90
10 µm	50
5 µm	30
2 µm	10

Tabla 5.13. Características de las probetas fabricadas (4,5% ligante s.a. excepto fíller)

CARACTERISTICAS	TIPO DE LIGANTE							
	B-60/70				B-Pol.1			
Ligante s.a. excepto fíller, %	4,5				4,5			
Fíller s.a. (%)	0	2,25	4,5	4+0,5f	0	2,25	4,5	4+0,5f
Relación f/b	0	0,5	1	1	0	0,5	1	1
Densidad (g/cm ³)	1,947	1,989	2,028	2,026	1,956	1,989	2,015	2,023
Desviación típica	0,0098	0,0067	0,0119	0,0107	0,0197	0,0139	0,0159	0,0118
Coefficiente de variación	0,0050	0,0034	0,0059	0,0053	0,0101	0,0070	0,0079	0,0058
Huecos en mezcla (%)	22,3	20,7	19,3	19,3	21,7	20,5	19,6	19,3
Desviación típica	0,3907	0,2610	0,4765	0,4223	0,7997	0,5673	0,6428	0,4780
Coefficiente de variación	0,0175	0,0127	0,0249	0,0221	0,0369	0,0278	0,0331	0,0250

El aumento de la relación fíller/betún se ha conseguido aumentando el contenido de fíller y manteniendo constante la cantidad de ligante utilizado, por lo que, en realidad, el porcentaje de ligante sobre la masa total de árido va disminuyendo. Este efecto se ha tenido en cuenta en el cálculo del porcentaje de huecos en mezcla, recogido en la tabla 5.13, en la que se observa, por el efecto “rellenador” del fíller, una disminución del contenido de huecos de hasta 3 puntos para el betún de penetración (algo menor para el betún modificado) al aumentar la relación fíller/betún de 0 a 1.

La tabla 5.14 recoge los valores obtenidos, según el procedimiento desarrollado, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas para cada tipo de ligante y relación fíller/betún ensayada.

Estos resultados muestran, para cada ligante y en todo el rango de temperaturas, menores pérdidas a medida que aumentamos la relación fíller/betún. En realidad, la disminución del porcentaje de huecos en mezcla que se produce al aumentar la relación fíller/betún puede influir sobre las pérdidas obtenidas.

Así, para el betún de penetración, al aumentar la relación fíller/betún de 0 a 1, el porcentaje de huecos pasa de un 22,3 a un 19,3% y las pérdidas a 300 revoluciones se reducen de un 16,5 a un 8,6%, para la temperatura de 25 °C. Para el betún modificado el efecto es ligeramente menor, ya que, para las mismas condiciones, el contenido de huecos pasa de un 21,7 a un 19,6%, y las pérdidas se reducen de un 9,9 a un 7,2%.

Ahora bien, si la disminución de pérdidas por desgaste fuera debida exclusivamente a la disminución del porcentaje de huecos en mezcla, se obtendrían curvas de estado más bajas pero sensiblemente paralelas. No obstante, a medida que aumentamos la relación fíller/betún -disminuyendo por tanto la porosidad de la mezcla-, no sólo se obtienen curvas más bajas sino también más suaves, es decir, aunque exista, como hemos visto, una cierta contribución de la reducción de la porosidad en la disminución de las pérdidas, es la disminución de la susceptibilidad térmica del mástico el factor predominante en la mejora del comportamiento de la mezcla.

Tabla 5.14. Pérdidas al cántabro a distintas temperaturas para diferentes relaciones fíller/betún, a 100, 200 y 300 revoluciones

REVOL. (Nº)	TEMP. (°C)	B-60/70				B-Pol.1			
		Contenido de fíller s.a. (%)				Contenido de fíller s.a. (%)			
		0	2,25	4,5	4+0,5f	0	2,25	4,5	4+0,5f
100	-30	73,2	22,2	16,3	12,1	19,8	14,0	14,3	9,7
	-10	30,1	17,3	13,5	8,4	20,4	11,5	9,8	5,9
	10	21,8	12,2	8,8	5,5	12,3	8,2	7,1	3,6
	25	5,1	2,9	2,7	1,5	2,1	1,8	1,9	1,0
	40	2,2	2,0	1,3	1,1	1,0	1,0	1,1	0,7
	60	4,8	2,0	0,6	0,8	1,4	0,3	0,5	0,3
200	-30	100	51,5	27,0	19,6	40,5	25,3	21,6	15,5
	-10	74,2	31,6	23,8	14,4	37,7	23,5	16,5	11,5
	10	47,7	23,6	15,9	9,0	21,6	14,6	11,9	6,5
	25	10,3	6,0	5,9	3,7	4,9	4,5	4,3	2,2
	40	7,4	4,3	3,3	2,7	3,8	2,1	2,8	1,5
	60	11,0	3,2	1,6	1,4	4,0	0,7	1,3	0,7
300	-30	100	86,0	36,9	27,3	52,8	37,2	30,3	21,1
	-10	90,0	44,8	32,2	20,0	47,2	34,0	22,0	15,1
	10	61,3	35,4	22,5	12,8	31,3	20,7	17,1	9,4
	25	16,5	8,8	8,6	5,3	9,9	6,8	7,2	3,9
	40	12,6	7,7	5,8	4,0	6,9	4,1	4,7	2,9
	60	14,5	5,6	2,7	2,7	7,4	1,4	1,8	1,4

Si comparamos las figuras 5.18 y 5.19 podemos observar que la mejora del comportamiento del betún B-60/70 con un 4,5% de fíller ($f/b = 1$) llega a superar incluso a la que se obtiene utilizando un betún modificado (B-Pol.1) sin adición de fíller, así como las progresivas mejoras de éste último al aumentar la carga mineral.

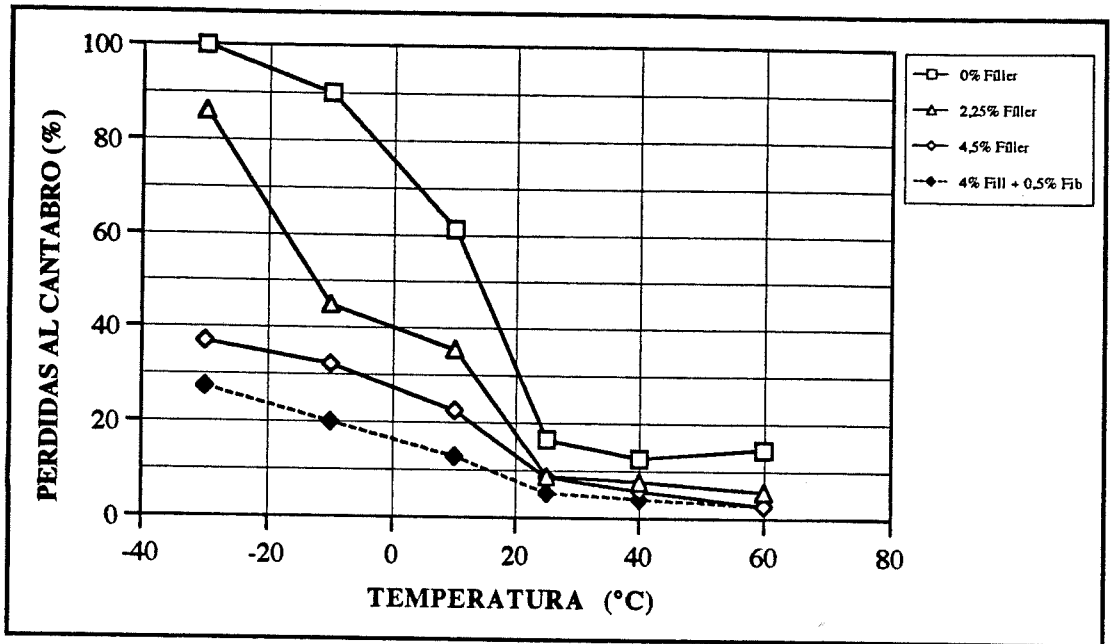


Figura 5.18. Efecto de la incorporación de fíller sobre la susceptibilidad térmica del betún B-60/70 (300 revoluciones)

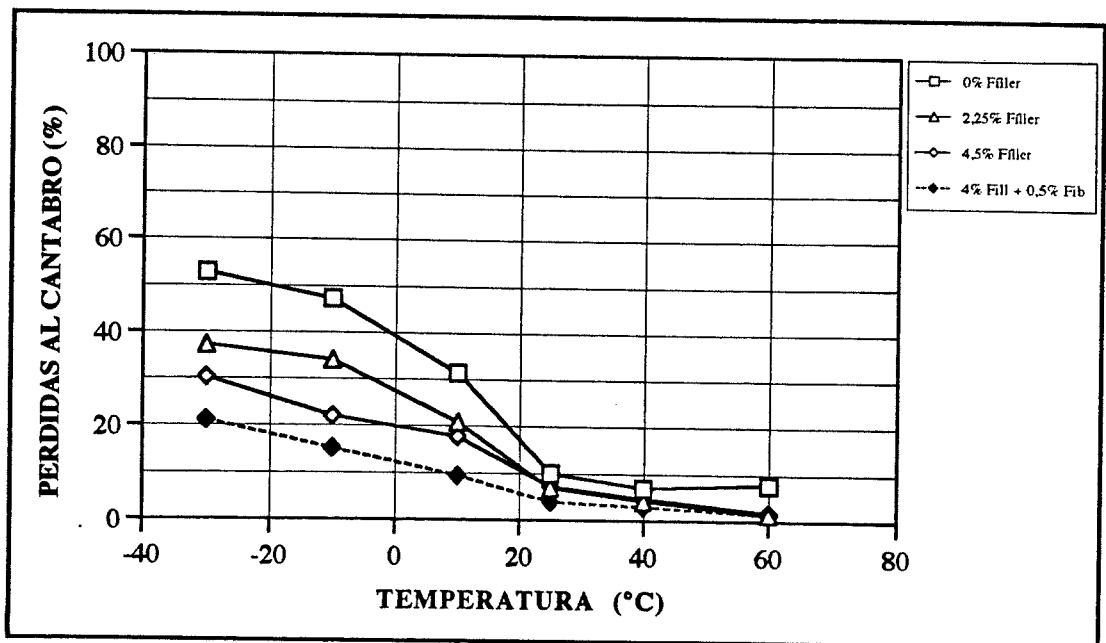


Figura 5.19. Efecto de la incorporación de fíller sobre la susceptibilidad térmica del betún B-Pol.1 (300 revoluciones)

Esta disminución de la susceptibilidad térmica es todavía más acusada cuando se utilizan fílleres especiales -con adición de fibras acrílicas- con los que el comportamiento de un mismo betún mejora notablemente, aún manteniéndose constante el contenido de huecos en mezcla.

La adición de fibras al mástico o la incorporación de polímeros al betún, buscan el mismo fin: mejorar la susceptibilidad térmica y disminuir la fragilidad del sistema, hacerlo más elástico y resistente a los impactos de forma que aumente su resistencia a la fisuración y a la acción abrasiva del tráfico [106, 107].

La fibra utilizada ha sido la Sekril 900-L (de 6 mm de longitud), de naturaleza acrilonitrílica, con alto módulo, cuyas características físico-químicas se recogen en la tabla 5.15.

Cuando se sustituye un 0,5% del polvo mineral por fibras acrílicas con objeto de mejorar la calidad del mástico, manteniendo constante la relación fíller/betún -igual a 1-, se obtienen curvas de estado más bajas y mucho más tendidas para los dos betunes ensayados, figuras 5.18 y 5.19.

Aunque el comportamiento de ambos betunes en este caso es muy similar, la mejora obtenida al aumentar la calidad del mástico es más acusada para el betún de penetración, en el que la reducción de las pérdidas a bajas temperaturas llega a ser del 73%, frente al 60% para el betún modificado.

Por tanto, la determinación de la curva de estado permite valorar también el efecto de las características del mástico fíller-betún sobre la cohesión y la susceptibilidad térmica del ligante, especialmente en caso de utilizar fílleres no convencionales, para los que los ensayos habituales de caracterización carecen de sentido.

Tabla 5.15. Características físico-químicas de la fibra acrílica utilizada

CARACTERISTICAS	SEKRIL 900	SEKRIL 940
Diámetro (μm)	38	80
Tenacidad (N/mm ²)	400-470	250-300
Densidad (g/cm ³)	1,18	1,18
Módulo (N/mm ²)	7000-8500	6500-7500
Alargamiento (%)	8-15	8-15
Encogimiento agua 100°C, %	máx.: 2	máx.: 2
Encogimiento glicol 180°C, %	5-8	5-8
Color	Blanco a pajizo	
Resistencia a los ácidos	Excelente	
Resistencia a los álcalis	Pérdida de un 5% en módulo tras el equivalente a 20 años en solución concentrada de NaOH	
Humedad retenida (%)	2	
Ensimajes contenidos	No iónicos	
Solubilidad en disolventes	Excelente, excepto para tiocianato sódico y dimetil formamida	
Punto reblandecimiento (°C)	210	
Precarbonización (°C)	320	
Comportamiento térmico	No funde, ni forma bolas; sólo carboniza, manteniendo su estructura	
Toxicidad	Nula	
Dispersabilidad en agua	Excelente	
Dispersabilidad en asfalto	Total y homogénea, lo mismo en centrales de mezcla en caliente como de emulsiones asfálticas, tanto en vía seca como húmeda	

8. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO: METODO UCL

Los resultados del trabajo realizado reflejan la idoneidad del ensayo cántabro de pérdida por desgaste para valorar las propiedades fundamentales de los ligantes asfálticos, permitiendo pues establecer un método completo de caracterización, basado en un único ensayo, rápido, sencillo y suficientemente preciso, como se ha visto en el capítulo anterior, capaz de evaluar directamente el comportamiento del ligante como parte integrante de la mezcla, y no el del material original que no ha experimentado calentamiento alguno.

Este método, que denominaremos método Universal de Caracterización de Ligantes (método UCL) permite determinar:

- la cohesión proporcionada por el ligante
- la curva de estado del ligante
- la adhesividad árido-ligante
- la curva de envejecimiento
- las características del mástico filler-betún

Cohesión

La determinación de las pérdidas por desgaste, a una temperatura determinada, permite valorar, directamente, la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla: cuanto mayor sea esta cohesión, mayor será la resistencia a la disgregación de la mezcla y menores serán las pérdidas obtenidas.

La temperatura de 25 °C no es quizás la más adecuada para valorar la cohesión de diferentes ligantes, ya que las pérdidas obtenidas pueden ser del mismo orden. A una temperatura ligeramente inferior, 18 °C, puede ponerse mejor de manifiesto la cohesión que proporcionan diferentes ligantes.

Curva de estado del ligante

La variación del comportamiento del ligante con la temperatura, **curva de estado**, puede evaluarse mediante la determinación de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, poniendo de manifiesto su comportamiento frágil a bajas temperaturas (altas pérdidas al cántabro), su comportamiento visco-elástico a temperaturas medias (pérdidas bajas) y su inconsistencia a altas temperaturas (fuerte incremento de las pérdidas), evaluando, por tanto, su susceptibilidad térmica: cuanto más tendida sea la curva de estado, menos susceptible será el ligante, y cuanto más cóncava, más susceptible.

Adhesividad árido-ligante

Por la acción de desenvuelta del agua, el ligante se separa del árido, disminuyendo, por tanto, la cohesión de la mezcla. El incremento de las pérdidas por desgaste determinadas en seco y tras inmersión de la mezcla en agua, está directamente relacionado con la adhesividad del ligante al árido: fuertes incrementos reflejan una mala adhesividad y viceversa.

Curva de envejecimiento

La resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos por la acción de los rayos ultravioletas y los agentes atmosféricos -aire, calor, agua, etc.- es una propiedad relacionada directamente con su durabilidad.

El proceso de envejecimiento se puede simular y acelerar en el laboratorio. La evaporación de compuestos volátiles y las reacciones de oxidación provocan un endurecimiento del ligante, volviéndose más frágil. La disminución de la resistencia a la disgregación de la mezcla puede determinarse mediante el ensayo cántabro, ensayando ligantes con distintos grados de envejecimiento: a mayor envejecimiento, mayores pérdidas.

Características del mástico fíller-betún

El efecto del fíller sobre las propiedades del ligante puede ser también evaluado mediante el ensayo cántabro, tanto determinando las pérdidas a distintas temperaturas (susceptibilidad térmica), como determinando las pérdidas en seco y tras inmersión (adhesividad) o las pérdidas tras envejecimiento. Además, este método permite valorar el comportamiento de fílleres no convencionales.