

**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 6

EMPLEO DEL METODO UCL

1. ESTUDIO REALIZADO

En el capítulo anterior se ha constatado la validez del ensayo cántabro de pérdida por desgaste -método UCL- para valorar las propiedades fundamentales de los ligantes asfálticos: cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y envejecimiento, y diferenciar el comportamiento de distintos ligantes, especialmente el de los ligantes modificados.

Además, el ensayo permite valorar la calidad del mástico filler-betún y comprobar el efecto de la utilización de filleres especiales o la incorporación de fibras.

No obstante, los betunes de penetración ensayados -B-60/70, B-80/100 y B-150/200- tienen características muy diferentes que obviamente conllevarán comportamientos también muy diferentes. Podría pensarse pues que la metodología desarrollada no aporta nada nuevo frente a los ensayos convencionales, salvo la sencillez y rapidez de utilizar un único ensayo para caracterizar las propiedades que tendrá el producto realmente en la práctica.

Se trata pues de demostrar la precisión y sensibilidad del método UCL, intentando diferenciar el comportamiento de diferentes betunes que muestren características similares cuando se utilizan ensayos convencionales.

Para ello, se solicitó a un fabricante de betunes que preparase tres betunes de igual penetración -B-60/70- pero con bases de diferente procedencia (para obtener diferentes comportamientos), que se caracterizarán tanto mediante ensayos convencionales, como mediante el método UCL.

Analogamente, un fabricante de betunes modificados preparó dos betunes modificados con el mismo betún base y distinto modificador, ya que aunque el método UCL se ha mostrado suficientemente sensible para diferenciar el comportamiento de distintos betunes modificados -y el de éstos respecto los betunes de penetración-, la diferencia de comportamiento detectada podría ser debida no sólo al modificador sino también al betún base, ya que los betunes modificados ensayados en el capítulo anterior procedían de distintos fabricantes.

El betún modificado M 1 se fabricó con el polímero EVA, mientras que el betún modificado M 2 se fabricó con el elastómero SBS, manteniéndose constante en ambos casos el porcentaje de polímero añadido: 4,5%.

Si se analizan las características de los betunes de penetración determinadas mediante los ensayos convencionales, tabla 6.1, se observa que:

- El valor de la penetración es prácticamente el mismo para los tres betunes, que se incluyen dentro del tipo B-60/70 indicado en las especificaciones.
- El índice de penetración obtenido para los tres betunes, pone de manifiesto que el betún N 1 es menos susceptible a la temperatura que el betún N 2, y éste a su vez, menos que el N 3. Este último no cumple las actuales especificaciones españolas ($-1 \leq IP \leq +1$).
- Los valores del punto de reblandecimiento anillo y bola muestran una progresiva disminución entre los tres ligantes, que llega a ser de 4 °C entre los betunes N 1 y N 3. Por su parte, el punto de fragilidad Fraass aumenta hasta 5°C. La diferencia entre ambos parámetros representa el intervalo de comportamiento visco-elástico del betún, esto es, su susceptibilidad térmica, confirmando la tendencia anteriormente indicada.
- No existe variación en los valores de la ductilidad, pese al distinto origen de los betunes.

Tabla 6.1. Características de los betunes de penetración

CARACTERISTICAS	LIGANTE		
	N 1	N 2	N 3
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s (0,1 mm)	64	67	64
Punto de reblandecimiento A y B (°C)	50,8	49,2	46,8
Indice de penetración	-0,4	-0,7	-1,4
Punto de fragilidad Fraass (°C)	-18	-15	-13
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	100+	100+	100+
Solubilidad en 1, 1, 1-Tricloroetano	99,5+	99,5+	99,5+
Contenido en agua (% en volumen)	0	0	0
Inflamabilidad V/A (°C)	250+	250+	250+
Densidad a 15°C (g/cm ³)	1,037	1,043	1,024
Ensayos sobre residuo de película fina			
Variación de masa (% en peso)	0,04	0,57	-0,1
Penetración a 25°C, 100g, 5s (% original)	62,5	64,2	70,3
Aumento del punto de reblan. A y B (°C)	7,7	6,5	4,2
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	56	100+	100+

- Los valores de solubilidad en 1.1.1-tricloroetano, contenido de agua e inflamabilidad son idénticos en los tres ligantes. Los valores de densidad tampoco presentan diferencias significativas, siendo el betún de mayor penetración ligeramente más denso.
- Aunque el betún N 2 presenta mayor pérdida de masa después del ensayo de envejecimiento en película fina que el betún N 1, probablemente por una mayor volatilización de fracciones ligeras, el betún N 3 presenta una ganancia de masa debida, probablemente, a las reacciones de oxidación y deshidrogenización o a un aumento de la proporción de asfaltenos (que son los componentes de mayor peso molecular) producido durante el envejecimiento.

- La disminución de la penetración sobre el residuo es más acusada para el betún N 1 que para el betún N 2, y mayores ambas que la del betún N 3, esto es, el betún N 1 es el que más envejecería durante la fabricación de la mezcla, seguido del N 2 y del N 3.
- El punto de reblandecimiento sobre el residuo aumenta proporcionalmente al valor original para los tres betunes, confirmándose que el betún N 1 es más susceptible al envejecimiento que el N 2, y éste a su vez, más que el N 3.
- La disminución del valor de la ductilidad sobre el residuo del betún N 1 corroboraría éste como el más susceptible al envejecimiento, mientras que, en base a este parámetro, no podría decirse nada respecto los betunes N 2 y N 3.

Analogamente, para los betunes modificados, tabla 6.2, se observa que:

- El valor de la penetración indica únicamente que el betún M 1 es más duro que el betún M 2.
- Comparando el punto de reblandecimiento anillo y bola y el punto de fragilidad Fraass de ambos ligantes -intervalo de plasticidad-, así como el índice de penetración, se observa que el betún M 1 es más susceptible a la temperatura que el betún M 2.
- La ductilidad, tanto a 5 como a 25 °C, es mayor para el betún M 2, esto es, tiene mayor capacidad de deformarse sin rotura, incluso a bajas temperaturas, condición que se conserva después del proceso de envejecimiento en película fina. Además, presenta una recuperación elástica sensiblemente superior al betún M 1.
- El betún M 2 presenta mayor viscosidad en todo el rango de temperaturas ensayado, por lo que presentará mayor cohesión y será menos susceptible a la temperatura y al proceso de envejecimiento que el betún M 1.

Tabla 6.2. Características de los betunes modificados

CARACTERISTICAS	LIGANTE	
	M 1	M 2
Penetración a 25°C (0,1 mm)	63	75
Punto de reblandecimiento A y B (°C)	64,1	76,7
Indice de penetración	2,47	5,07
Temperatura de fragilidad Fraass (°C)	-18	-19
Intervalo de plasticidad (°C)	82,1	95,7
Ductilidad a 5°C (cm)	10	63
Ductilidad a 25°C (cm)	29	>100
Recuperación elástica (%)	40	95
Viscosidad a 135°C (cSt)	715	901
Viscosidad a 150°C (cSt)	376	527
Viscosidad a 165°C (cSt)	209	307
Estabilidad al almacenamiento		
Penetración a 25°C (0,1 mm) Superior	68	79
Penetración a 25°C (0,1 mm) Inferior	70	78
Temperatura de A y B (°C) Superior	63,8	78,0
Temperatura de A y B (°C) Inferior	64,9	77,3
Oxidación en película fina		
Pérdida/Ganancia (%)	0,004	-0,02
Penetración a 25°C (0,1 mm)	48	57
Penetración retenida (%)	76	76
Temperatura de A y B (°C)	59,1	73,6
Incremento de Temperatura de A y B (°C)	5,0	3,1
Ductilidad a 5°C (cm)	6	45

- Aunque ambos ligantes presentan una buena estabilidad al almacenamiento, reflejando una correcta dispersión y buena compatibilidad del polímero con el betún, el betún M 2 (SBS) se muestra ligeramente mejor que el betún M 1 (EVA).
- Ni la pérdida de masa, ni la penetración sobre el residuo, aportan información sobre diferentes comportamientos frente al envejecimiento. En cambio si lo hacen el punto de reblandecimiento y la ductilidad, que ponen de manifiesto, como ya se ha indicado, que el betún M 2 es menos susceptible al envejecimiento que el betún M 1.

Aunque para los betunes modificados, parece observarse una clara diferencia de comportamiento a favor del betún M 2, no puede decirse lo mismo de los betunes de penetración, donde los resultados son en algunos casos contradictorios. Además, muchos de los ensayos convencionales realizados no aportan ninguna información o, en el mejor de los casos, ratifican alguna propiedad ya conocida, con el inconveniente que supone el realizar un número tan elevado de ensayos, algunos de ellos de difícil ejecución y falta de precisión.

Para evaluar el comportamiento real de estos betunes, se aplicará el método UCL, manteniendo las mismas constantes de ensayo descritas en el capítulo anterior: tipo, naturaleza y composición granulométrica, y porcentaje de ligante.

1.1 CURVA DE ESTADO

Con cada tipo de ligante, y con el mismo porcentaje utilizado -4,5% s.a.- se fabricaron series de 21 probetas, que se agruparon en 7 grupos de 3 probetas cada uno. Cada grupo de probetas se mantuvo durante 12 horas a las temperaturas de -30, -10, 10, 25, 40, 60 y 70 °C respectivamente. Inmediatamente, se ensayaron a 100, 200 y 300 revoluciones, manteniendo la temperatura de la cámara termostática en 25 °C.

Se ha seleccionado una temperatura extrema adicional, 70 °C, con objeto de intentar definir mejor la rama de comportamiento inconsistente de la curva de estado de los betunes ensayados.

Los valores de densidad y contenido de huecos obtenidos, tabla 6.3, muestran de nuevo la escasa dispersión conseguida en la fabricación de las probetas de cada serie, con coeficientes de variación, para el porcentaje de huecos, comprendidos entre 0,012 y 0,026.

Tabla 6.3. Características de las probetas fabricadas (4,5% de ligante)

CARACTERISTICAS	TIPO DE LIGANTE				
	N 1	N 2	N 3	M 1	M 2
Densidad (g/cm ³)	1,924	1,911	1,955	1,956	1,942
Desviación típica	0,0132	0,0156	0,0065	0,0071	0,0139
Coefficiente de variación	0,0069	0,0082	0,0033	0,0036	0,0071
Huecos en mezcla (%)	23,1	23,7	21,8	21,8	22,3
Desviación típica	0,5312	0,6233	0,2595	0,2881	0,5678
Coefficiente de variación	0,0230	0,0263	0,0119	0,0132	0,0254

No obstante, comparando el porcentaje de huecos en mezcla de distintas series, se observa una variación máxima de 1,9 puntos entre el betún N 3 (21,8%) y los otros dos betunes de penetración, N 1 y N 2 (23,1 y 23,7% respectivamente) que podría influir en las pérdidas, en el sentido de obtener valores menores para el betún N 3. Caso de confirmarse este hecho, debería tenerse en cuenta en el momento de comparar el comportamiento entre ellos.

En cambio, los betunes modificados presentan una variación en el contenido de huecos de 0,5 puntos (21,8 y 22,3% para el M 1 y M 2 respectivamente), que no tendrá ninguna influencia en el valor de las pérdidas, pero entre éstos y los betunes de

penetración, la variación máxima es de nuevo de 1,9 puntos (entre el M 1 y el N 2), lo que podría ser necesario tener en cuenta al extraer conclusiones de la comparación directa entre ellos.

La tabla 6.4 recoge los valores obtenidos, según el procedimiento desarrollado, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas para cada uno de los ligantes ensayados.

En prácticamente todo el rango de temperaturas y para cualquier grado de severidad del ensayo, el betún N 3 presenta pérdidas más altas que cualquier otro ligante, en contra de lo que cabría esperar atendiendo exclusivamente a la porosidad alcanzada (la más baja), por lo que, aunque ésta pueda tener una mínima influencia en el valor de las pérdidas, es posible despreciar su efecto y atribuir la variación de comportamiento únicamente al tipo de ligante.

Con objeto de visualizar mejor los diferentes comportamientos, se ha representado, para cada uno de los ligantes, las curvas de estado a 100 revoluciones, figura 6.1. Entre los betunes de penetración, el N 1 presenta una curva más tendida, especialmente a bajas temperaturas, donde las pérdidas no superan el 50% ni siquiera a la temperatura más extrema. En este mismo rango de temperaturas, los betunes N 2 y N 3 presentan pérdidas cada vez mayores, que llegan a ser del orden del doble para éste último, esto es, el betún N 3 es más frágil que el N 2, y éste a su vez, más que el N 1.

Para la temperatura de 40 °C las curvas de estado de los tres betunes alcanzan valores mínimos muy similares (2,1; 2,0 y 2,4% respectivamente), y a partir de este punto se produce un incremento de las pérdidas a medida que aumenta la temperatura (comportamiento inconsistente). Este aumento de pérdidas es más rápido para el betún N 1, que a 60 °C alcanza pérdidas del 16,6% (frente al 3,4 y 2,2% de los betunes N 2 y N 3 respectivamente), aunque no sea éste el que presente mayores pérdidas a 70 °C. A esta temperatura, el betún N 3 se muestra como el más inconsistente, seguido del N 1 y del N 2.

Tabla 6.4. 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				
		N 1	N 2	N 3	M 1	M 2
100	-30	46,6	75,7	100	31,5	16,7
	-10	31,3	53,1	57,8	27,5	15,0
	10	20,4	24,1	29,5	11,9	8,3
	25	3,9	4,7	7,7	2,0	1,8
	40	2,1	2,0	2,4	1,1	0,8
	60	16,6	3,4	2,2	0,2	0,5
	70	59,4	48,9	68,1	43,2	34,8
200	-30	100	100	100	64,1	29,1
	-10	54,7	79,3	89,7	48,1	28,4
	10	41,0	46,5	59,3	21,9	14,6
	25	11,4	9,8	15,0	4,7	4,1
	40	6,8	5,6	6,7	2,4	2,2
	60	30,2	7,7	3,5	3,3	1,4
	70	65,2	76,2	74,9	45,4	43,5
300	-30	100	100	100	88,9	40,3
	-10	79,7	92,4	96,9	69,1	36,6
	10	56,1	60,4	76,1	30,6	20,2
	25	16,4	14,6	22,6	8,7	6,9
	40	12,0	10,7	10,9	5,6	4,8
	60	39,8	12,2	8,5	7,3	6,3
	70	66,6	76,6	75,3	45,2	43,8

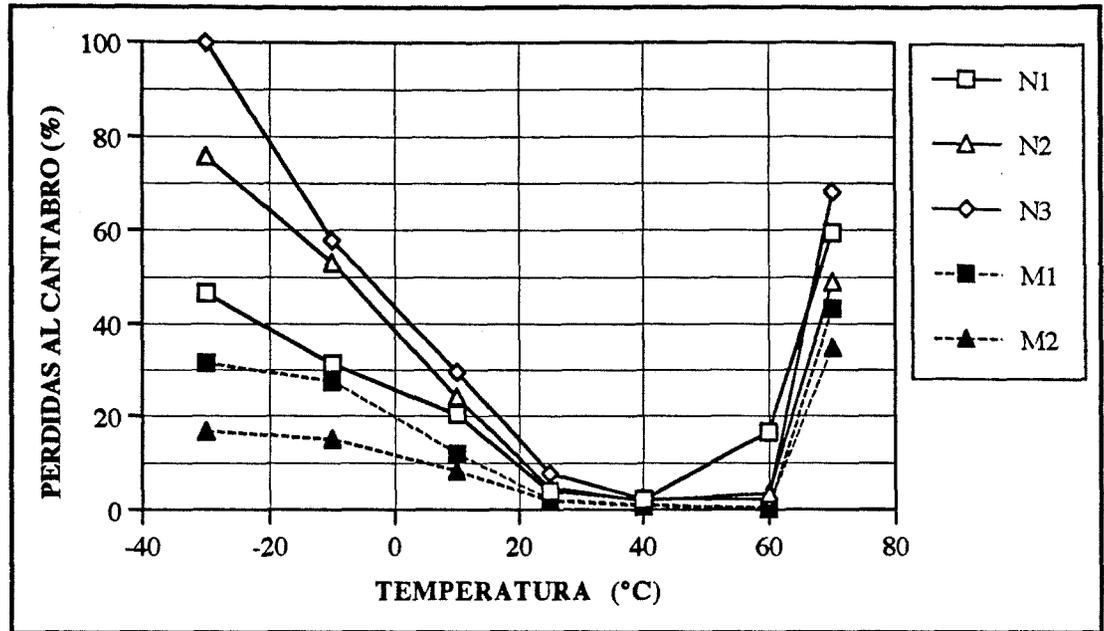


Figura 6.1. Efecto de la temperatura sobre las pérdidas por desgaste a 100 revoluciones

A pesar de haber introducido una temperatura de ensayo adicional para definir mejor el comportamiento de los betunes a altas temperaturas, no podemos hablar de valores concretos claramente diferenciados, sino únicamente de las tendencias generales de las ramas inconsistentes, ya que a estas temperaturas, las probetas son excesivamente deformables y amortiguan el impacto sin aumentar las pérdidas.

Estas tendencias quedan claramente de manifiesto al aumentar la severidad del ensayo (300 revoluciones), figura 6.2, donde se observa como las pérdidas aumentan rápidamente entre 40 y 60 °C para el betún N 1, mientras que permanecen prácticamente constantes para los betunes N 2 y N 3, aunque son estos dos últimos betunes los que se muestran más inconsistentes a partir de 60 °C.

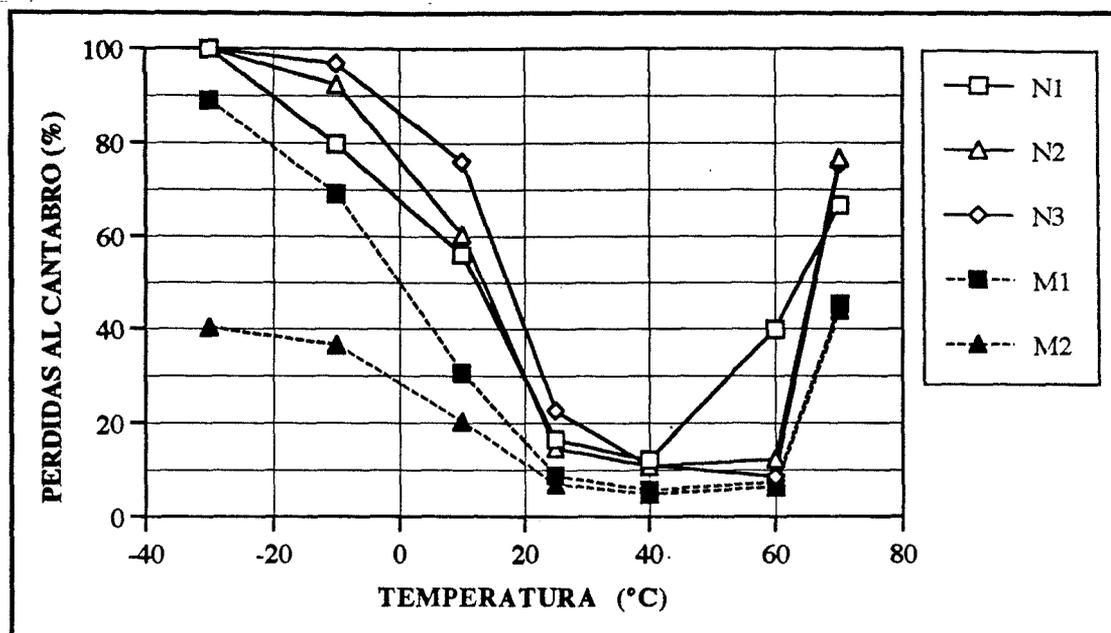


Figura 6.2. Efecto de la temperatura sobre las pérdidas por desgaste a 300 revoluciones

Para los betunes modificados se obtienen curvas de estado mucho más tendidas y más bajas que las correspondientes a los betunes de penetración, esto es, presentan menor susceptibilidad térmica. Tal como ya se había puesto de manifiesto en el capítulo anterior, el betún modificado con SBS (M 2) es menos susceptible que el modificado con EVA (M 1). A bajas temperaturas las pérdidas son del orden del doble para el M 1, mostrándose más frágil que el M 2; a partir de 25 °C, ambos betunes muestran un comportamiento muy similar, con pérdidas ligeramente inferiores para el betún M 2, tendencia que se mantiene también en la rama inconsistente (a partir de 60 °C).

Los diferentes comportamientos, tanto de los betunes de penetración como de los betunes modificados, quedan claramente reflejados mediante sus curvas de estado, que además de confirmar la información proporcionada por los ensayos convencionales, detallan mucho más su comportamiento en todo el rango de temperaturas ensayadas.

1.2 ADHESIVIDAD ARIDO-LIGANTE

Para evaluar la adhesividad de los ligantes ensayados frente a nuestro árido tipo, se han seleccionado dos condiciones de inmersión diferentes. Por una parte, se mantendrán las condiciones utilizadas en el capítulo anterior, manteniendo las probetas sumergidas durante 4 días a 35 °C, lo que permitirá poder comparar los resultados con los anteriormente obtenidos para otros tipos de ligantes. Por otra parte, se utilizarán las condiciones de inmersión habitualmente utilizadas en el ensayo sobre mezclas, 1 día a 60 °C, con objeto de comprobar tanto el comportamiento de los ligantes al aumentar la severidad de las condiciones de inmersión, como la posibilidad de adoptar estas condiciones para reducir la duración del ensayo.

A continuación del período de inmersión en agua, las probetas permanecerán secándose al aire, a la temperatura de 25 °C durante un día, y serán ensayadas a 100, 200 y 300 revoluciones a la misma temperatura.

De las 9 probetas fabricadas para cada tipo de ligante, 3 se ensayarán directamente, después de mantenerlas durante 12 horas a 25 °C, 3 se ensayarán después de inmersión 4 días a 35 °C (condiciones A) y las otras 3, se ensayarán después de inmersión 1 día a 60 °C (condiciones B).

Las densidades y contenidos de huecos obtenidos fueron muy similares a los obtenidos en series anteriores, con coeficientes de variación comprendidos entre el 1 y el 3%.

Los resultados obtenidos en el ensayo aparecen en la tabla 6.5. Si representamos las pérdidas en seco y tras inmersión (condiciones A y B) obtenidas para cada uno de los ligantes ensayados, en función del número de revoluciones del tambor, figura 6.3, podrá observarse en primer lugar que el incremento de las pérdidas tras inmersión es más acusado tanto al aumentar la severidad del ensayo (revoluciones) como al aumentar la severidad de las condiciones de inmersión, llegando a valores próximos al 100% a 300 revoluciones en las condiciones B para cualquier ligante.

Tabla 6.5. Pérdidas al cántabro en seco y tras inmersión a 100, 200 y 300 revoluciones

REVOL. (Nº)	CONDICIONES DE ENSAYO	TIPO DE LIGANTE				
		N 1	N 2	N 3	M 1	M 2
100	Seco	3,9	4,7	7,7	2,0	1,8
	Inmersión (A)	37,6	35,5	64,7	15,3	13,9
	Inmersión (B)	90,0	92,4	96,6	23,2	67,3
200	Seco	11,4	9,8	15,0	4,7	4,1
	Inmersión (A)	75,1	73,0	93,5	57,5	75,3
	Inmersión (B)	96,7	100	100	79,7	88,3
300	Seco	16,4	14,6	22,6	8,7	6,9
	Inmersión (A)	91,1	90,0	100	77,4	89,7
	Inmersión (B)	98,5	100	100	88,1	92,9

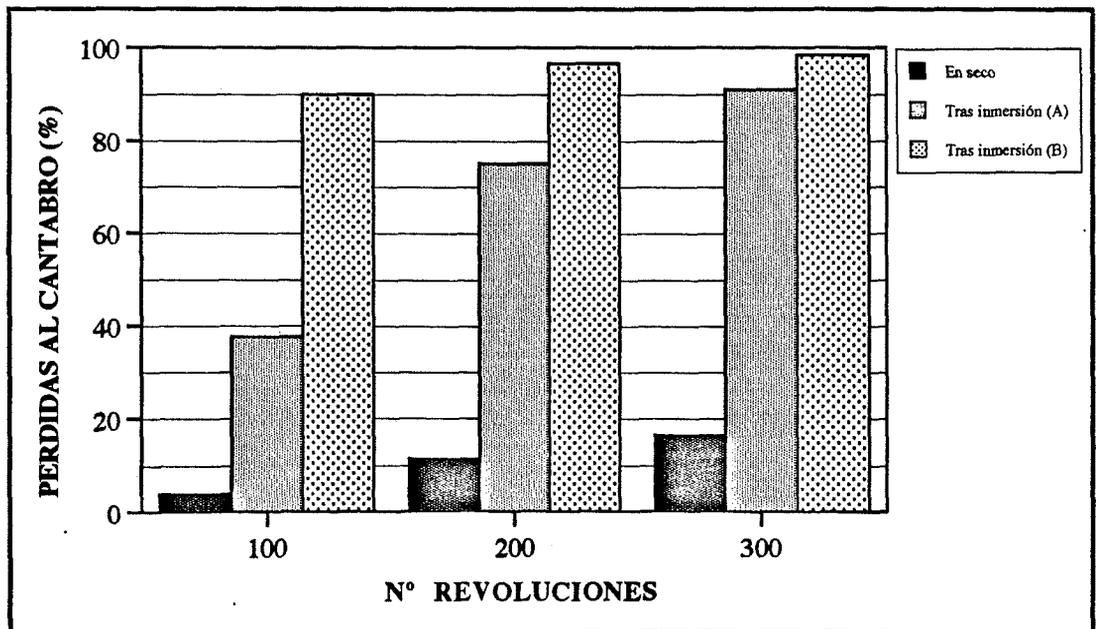


Figura 6.3. Efecto de las condiciones de inmersión y de la severidad del ensayo sobre las pérdidas por desgaste. B-60/70

Tal como ya se indicó en el capítulo anterior, deben escogerse los menores grados de severidad del ensayo con objeto de visualizar mejor la diferencia de comportamientos entre los ligantes, descartándose entonces la posibilidad de utilizar las condiciones B de inmersión.

La figura 6.4 muestra las pérdidas en seco y tras inmersión (condiciones A) obtenidas a 100 revoluciones para cada uno de los ligantes ensayados. Entre los betunes de penetración, el N3 presenta peor adhesividad, con casi el doble de pérdidas tras inmersión (64,7%), que los otros dos, que presentan una adhesividad muy similar (37,6 y 35,5% para el N1 y el N2 respectivamente).

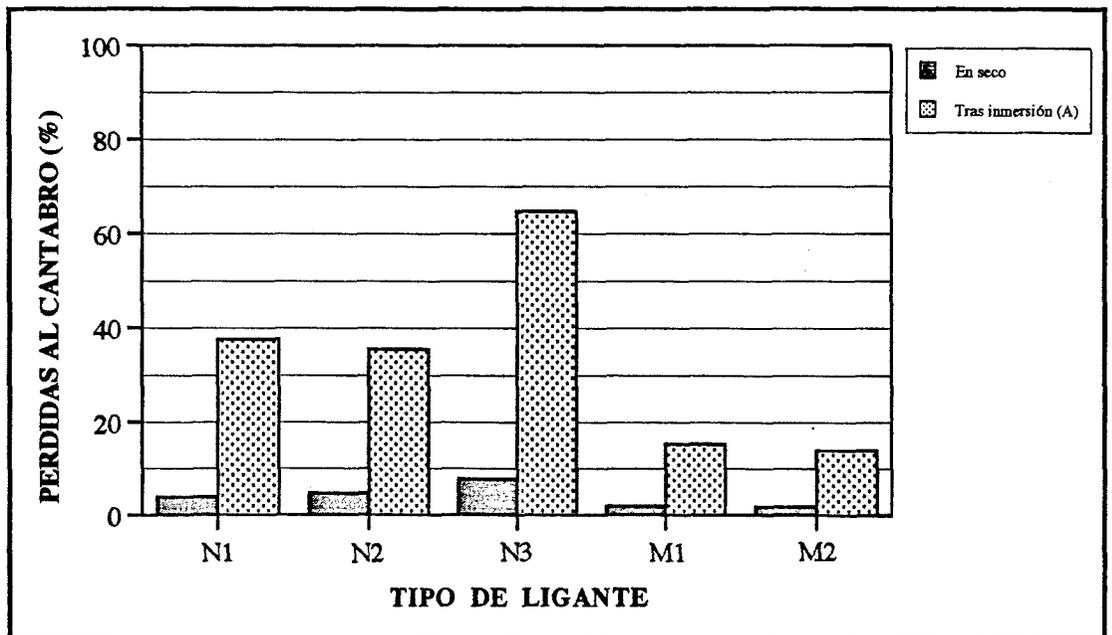


Figura 6.4. Efecto del tipo de ligante sobre las pérdidas en seco y tras inmersión (condiciones A) a 100 revoluciones

Por su parte, los betunes modificados presentan mejor adhesividad que cualquiera de los betunes de penetración, mostrándose mejor el M 1, aunque prácticamente no se aprecia a 100 revoluciones. En cambio a 300 vueltas, figura 6.5, se observa como el M 1 se mantiene con pérdidas inferiores a las de cualquier otro ligante, mientras que el M 2 alcanza valores más altos, similares a los de los betunes N 1 y N 2 (del orden del 90%).

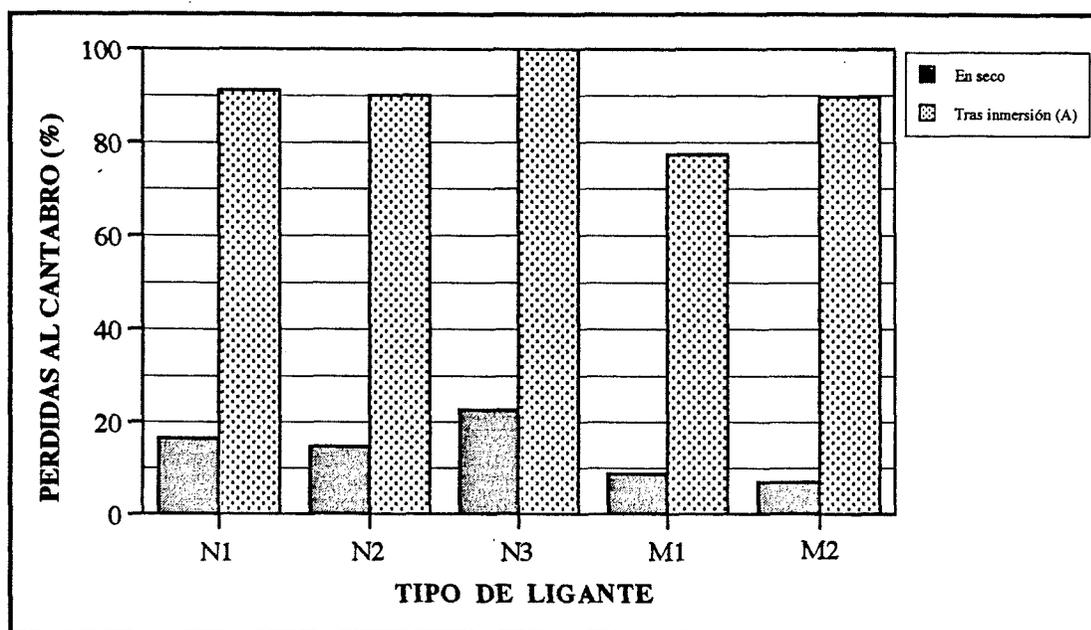


Figura 6.5. Efecto del tipo de ligante sobre las pérdidas en seco y tras inmersión (condiciones A) a 300 revoluciones

De nuevo, en el caso de los ligantes modificados, el que presenta mejor adhesividad (M 1) es también el más susceptible a la temperatura, lo que pone de manifiesto la necesidad de escoger el ligante en base a las necesidades específicas que requiera su uso.

Los ensayos convencionales efectuados previamente no aportaban ninguna información sobre la mejor o peor adhesividad de estos ligantes.

1.3 ENVEJECIMIENTO

Con cada tipo de ligante, se fabricaron series de 12 probetas que se agruparon en 4 grupos de 3 probetas cada uno. El primer grupo no se sometió a ningún período de envejecimiento (0 horas), es decir, estuvo sometido únicamente a las condiciones del proceso de mezcla, para simular las condiciones en que estará el ligante inmediatamente después de su puesta en obra. Los tres grupos restantes permanecerán durante 2,5, 10 y 20 horas respectivamente a la temperatura de 163 °C en una estufa de aire forzado, invirtiéndose la posición de las probetas cada 2,5 horas, con objeto de evitar la acumulación de ligante en la base por escurrimiento.

Se han suprimido los períodos de envejecimiento más largos (de 40 y 72 horas) con objeto de reducir el tiempo de ensayo y comprobar si los períodos considerados son suficientes para mostrar la mayor o menor sensibilidad de los ligantes frente al envejecimiento (recuérdese que la evolución de la penetración y del punto de reblandecimiento con el tiempo de envejecimiento acelerado de los ligantes ensayados en el capítulo anterior se mantenía prácticamente constante a partir de las 20 horas).

Finalizado el período de envejecimiento, las probetas se dejaban enfriar y se ensayaban a 25 °C, a 100, 200 y 300 revoluciones, después de permanecer durante 12 horas a la temperatura de ensayo. Los resultados obtenidos están recogidos en las tablas 6.6 y 6.7.

Las porosidades obtenidas son prácticamente iguales, con coeficientes de variación comprendidos entre 0,016 y 0,036. Para los tres betunes de penetración, el contenido de huecos es del 21,8%, y para los betunes modificados el valor medio es del 22,2% ($\pm 0,2$). La máxima variación entre distintos ligantes es tan sólo de 0,6 puntos (entre el N3 y el M2).

Tabla 6.6. Características de las probetas fabricadas (4,5% de ligante)

CARACTERISTICAS	TIPO DE LIGANTE				
	N 1	N 2	N 3	M 1	M 2
Densidad (g/cm ³)	1,956	1,955	1,953	1,956	1,941
Desviación típica	0,0087	0,0110	0,0198	0,0077	0,0139
Coefficiente de variación	0,0045	0,0056	0,0101	0,0039	0,0071
Huecos en mezcla (%)	21,8	21,9	21,8	22,0	22,4
Desviación típica	0,3575	0,4431	0,7944	0,5627	0,5675
Coefficiente de variación	0,0164	0,0202	0,0364	0,0256	0,0253

Tabla 6.7. Pérdidas al cántabro para diferentes grados de envejecimiento (a 163 °C) a 100, 200 y 300 revoluciones

REVOL. (Nº)	TIEMPO DE ENVEJEC. (horas)	TIPO DE LIGANTE				
		N 1	N 2	N 3	M 1	M 2
100	0	3,9	4,7	7,7	2,0	1,8
	2,5	5,9	9,8	13,3	3,6	2,0
	10	18,5	27,8	32,0	13,6	4,9
	20	29,7	27,5	37,3	24,0	10,5
200	0	11,4	9,8	15,0	4,7	4,1
	2,5	13,5	18,0	28,6	9,7	5,0
	10	37,8	44,0	57,3	24,9	10,8
	20	49,8	46,8	65,7	46,9	19,7
300	0	16,4	14,6	22,6	8,7	6,9
	2,5	22,3	25,4	45,4	14,4	9,4
	10	54,4	56,5	73,1	36,1	16,0
	20	64,5	60,1	89,3	65,2	25,3

Entre los betunes de penetración, el N 3 se muestra claramente como el más susceptible al envejecimiento, con pérdidas más altas para todos los períodos de envejecimiento. Los betunes N 1 y N 2 muestran unas pérdidas muy similares, reflejando comportamientos también muy similares.

La forma de la curva de envejecimiento, figura 6.6, es muy parecida para los tres betunes, produciéndose un rápido envejecimiento entre las 0 y las 10 horas (más acusado para el N 3) que se va ralentizando a partir de las 10 horas, esto es, su envejecimiento es más acusado a corto plazo.

Como puede observarse, la información proporcionada por el método UCL es mucho más precisa y completa que la que proporcionan los ensayos convencionales, ya que está basada en el deterioro de las propiedades cohesivas del ligante y no sobre la variación relativa de ciertas propiedades que a veces no concuerdan con la respuesta práctica de dicho ligante, caso del betún N 3.

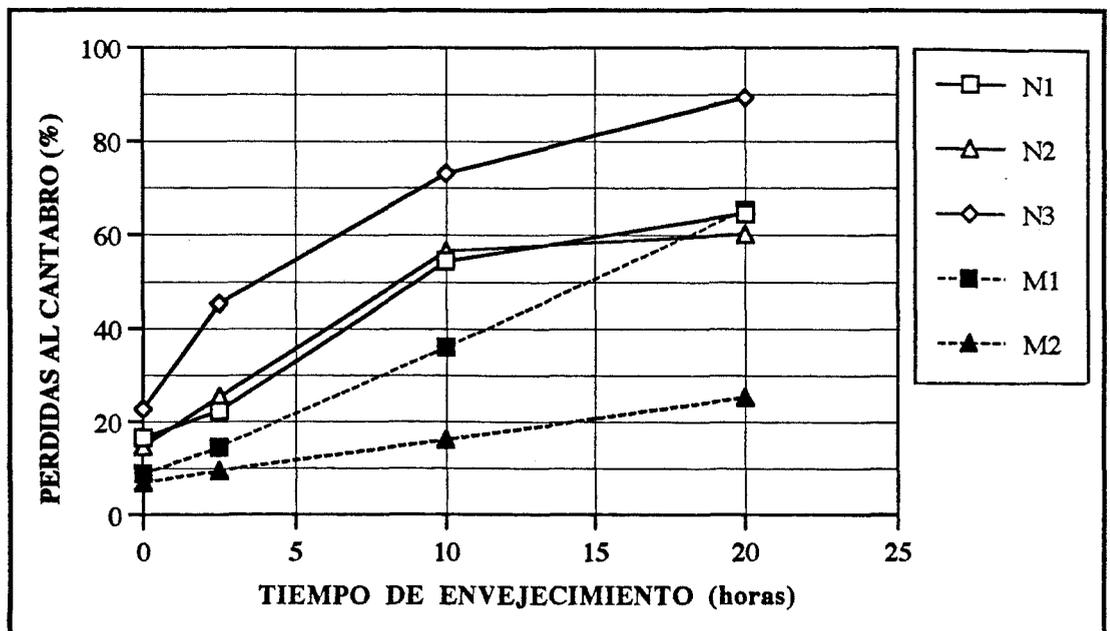


Figura 6.6. Efecto del grado de envejecimiento sobre las pérdidas por desgaste a 300 revoluciones para cada uno de los ligantes ensayados

La curva de envejecimiento para los betunes modificados es prácticamente lineal, con un aumento progresivo de las pérdidas, más acusado para el betún M 1 que presenta una pendiente más fuerte que la del M 2.

El betún M 2 se muestra más resistente al envejecimiento, con pérdidas del 25,3% a 20 horas y a 300 vueltas, frente al 65,2% del M 1, valor éste último muy similar (incluso ligeramente mayor) al de los betunes de penetración N 1 y N 2 (64,5 y 60,1% respectivamente). Esto pone de manifiesto la escasa importancia que tiene el modificador en este caso (M 1), ya que tras sólo 20 horas de envejecimiento acelerado su comportamiento es igual al de un betún sin modificar; su efecto únicamente se aprecia a corto plazo. Sin embargo, el efecto del modificador en el betún M 2 es muy notable, ya que se mantiene con unas pérdidas muy bajas para todos los grados de envejecimiento.