

TIPOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAUCHO DE NEUMÁTICOS. EXPERIENCIA ESPAÑOLA EN LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS.

Juan Gallego Medina

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Jorge N. Prieto Muñoz

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

RESUMEN

Existen varias tecnologías para la incorporación de caucho de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas. Podría hablarse principalmente de la llamada vía seca, en la que el caucho se incorpora como una fracción de áridos y de la vía húmeda, en la que se fabrica un betún-caucho que según contenga alrededor del 10% o bien del 20% de caucho se llamará vía húmeda de bajo contenido de caucho o de alto contenido de caucho, respectivamente.

Esta Comunicación Técnica explica las diferentes características de las tres tecnologías, y en consecuencia las aplicaciones más idóneas en construcción y conservación de carreteras, dándose algunos ejemplos españoles muy recientes.

Como conclusión más importante puede extraerse que cuanto más caucho se incorpora y mayor es el contenido de ligante en la mezcla bituminosa mayor es la resistencia a fatiga y a las fisuras reflejadas. En este sentido las mezclas con betunes de alto contenido de caucho parecen ser las más ventajosas para su empleo en conservación de carreteras.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de dos décadas España ha conocido una época de apogeo de los betunes modificados con polímeros. Se han empleado sobre todo en capas de rodadura, particularmente en mezclas porosas y en microaglomerados en caliente de granulometría discontinua para capas delgadas.

La novedad ahora está en el polímero que se utiliza: caucho procedente de la trituración de neumáticos que han llegado al final de su vida útil, lo que oficialmente ha dado en llamarse neumáticos fuera de uso (NFU's).

En España se generan cada año unas 300.000 toneladas de NFU's, poco más o menos, de las que un 80% están constituidas por caucho, y el resto por fibra textil y cables de acero.

El caucho se ha empleado con éxito en la fabricación de pavimentos para instalaciones deportivas o áreas de recreo infantil. También para la fabricación de productos como esterillas, tacos de goma para diversos usos, bordillos, etc. Pero estos usos no son capaces de absorber las enormes cantidades de NFU's que se generan cada año.

Por otro lado, en Estados Unidos de América viene empleándose este residuo como mejorador de mezclas bituminosas para carreteras, con bastante éxito. Se trata de la fabricación de un betún modificado con caucho –en adelante betún caucho- que a continuación se emplea en la fabricación de mezcla bituminosa.

Todo ello ha hecho que los gestores de residuos vuelvan sus ojos sobre estas técnicas para verlas como una parte sustancial de la solución del problema de los neumáticos fuera de uso, lo que ha obligado a los técnicos de carreteras a estudiar más a fondo las posibilidades que ofrecen estas tecnologías.

2. MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAUCHO DE NEUMÁTICOS POR VÍA SECA.

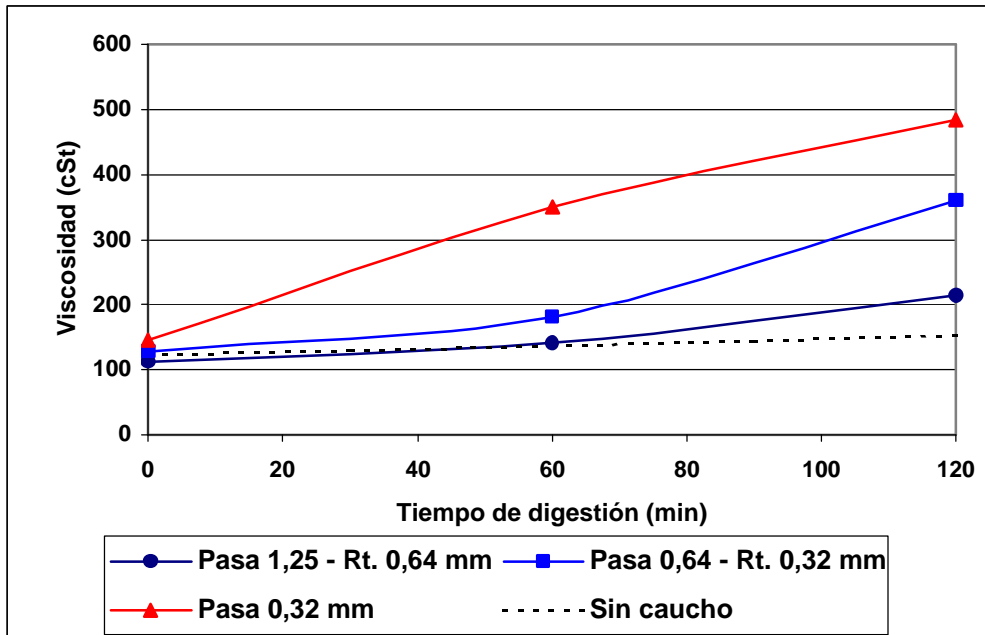
La técnica consiste en añadir caucho de neumáticos, generalmente de granulometría fina, no mayor de 0,5 mm, a la mezcla bituminosa durante su fabricación, como si se tratase de una fracción más de los áridos.

Sin embargo no se trata de una fracción más de los áridos, dado que aquéllos pueden considerarse un material inerte, que con mucho absorberá una pequeña proporción del ligante. El polvo de caucho, por el contrario, no es un inerte sino que interacciona con el betún asfáltico que se emplea como ligante de la mezcla bituminosa. Este proceso de interacción, en el que el caucho capta parte de las fracciones más volátiles del betún, se ha dado en llamar *digestión* del caucho, terminología que se empleará aquí.

Mediante la digestión el caucho pasa de ser un “árido elástico” a ser un modificador del betún y de la mezcla bituminosa. La digestión es un proceso que prolifera desde la superficie de la partícula de caucho hacia su interior, por lo que será más rápida cuanto más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla bituminosa –la proporción betún/caucho más alta-, y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra. En laboratorio la digestión puede simularse manteniendo la mezcla en estufa, a unos 150°C aproximadamente, durante el tiempo que se desee, previamente a la compactación de la probeta.

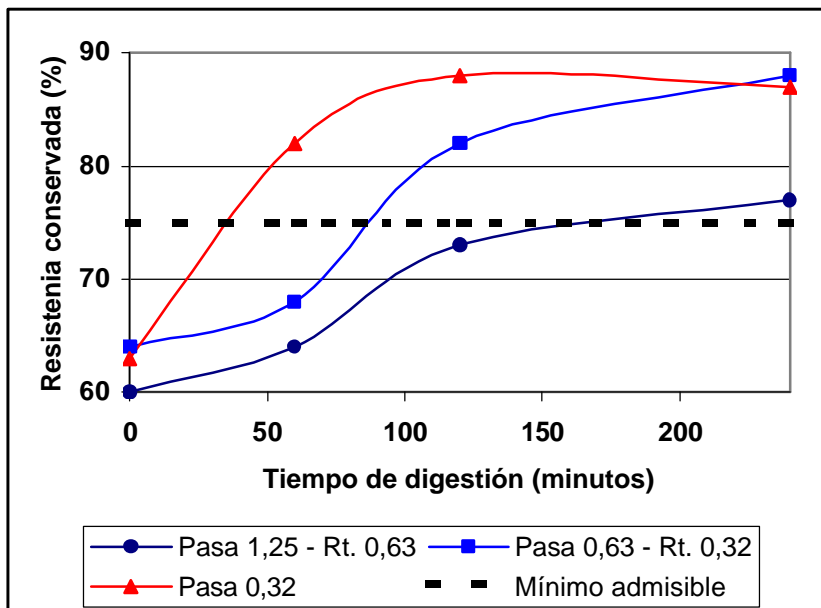
El fenómeno de la digestión, y en definitiva el grado de modificación que el betún de la mezcla progresivamente alcanza quedaron de manifiesto en unos ensayos de laboratorio en los que varias mezclas bituminosas se sometieron a digestión en estufa, y posteriormente se recuperó su ligante en destilador rotatorio para a continuación medir su viscosidad [1].

La gráfica 1 presenta los resultados de viscosidad. Se observa que cuanto más tiempo de digestión se tiene, y cuanto más fino es el polvo de caucho empleado, mayor es el grado de digestión y con él la viscosidad.



Gráfica 1. Evolución de la viscosidad con el tiempo de digestión [1].

Las consecuencias de la falta de digestión son serias: la mezcla bituminosa se deteriora tras el primer invierno en servicio. El agua ataca a la mezcla y la lleva a desintegrarse progresivamente. Para evitar esta situación es preciso durante el diseño de la mezcla bituminosa estimar cual será el tiempo de digestión mínimo para alcanzar el grado de digestión suficiente. La gráfica 2 muestra unas curvas elaboradas para una mezcla S-20, en la que mediante el ensayo de Inmersión compresión se establecen los tiempos de digestión mínimos para contenidos de caucho por vía seca del 1% s/áridos.



Gráfica 2. Evolución de la resistencia conservada en inmersión compresión al incrementarse el tiempo de digestión, para distintos tamaños del polvo de caucho [1].

Dicha gráfica no es, en términos absolutos, aplicable directamente a cualquier mezcla con caucho por vía seca, puesto que el contenido de ligante y su naturaleza tienen influencia. Sin embargo las tendencias que se observan sí lo son. Se advierte en la gráfica 2 que con un caucho fino se precisa sólo un tiempo de digestión menor de una hora, que en general está disponible en cualquier obra de pavimentación, dado que los camiones deben ir de central a obra e ir alimentando la máquina extendedora, lo que también consume un tiempo que debe entenderse como de digestión del caucho, puesto que la mezcla permanece a más de 120°C, que podría considerarse como el límite inferior del rango de temperaturas a que se desarrolla la digestión.

En consecuencia, durante el proceso de dosificación de la mezcla deberá comprobarse, entre otras cosas, que la dosificación de ligante adoptada y el tiempo de digestión disponible en obra permiten la digestión del caucho, lo que puede certificarse mediante el ensayo de Inmersión compresión.

En mezclas de granulometría continua o en microaglomerados discontinuos no es necesaria, en principio, la disminución de arena para tener en cuenta la aportación de caucho.

Por lo demás los requisitos a cumplir serán los mismos que el de cualquier mezcla bituminosa, y su dosificación se puede hacer de acuerdo con los artículos 542 y 543 del PG-3 (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes) del Ministerio de Fomento, prestando especial atención al ensayo de Inmersión compresión para asegurar que el tiempo de digestión disponible en obra será suficiente.

La resistencia a las deformaciones plásticas está asegurada en mezclas de cualquier granulometría, como cuando se emplean los betunes caucho. Ésta es una constante en todas las mezclas bituminosas que incorporan caucho, sea por vía húmeda o por vía seca.

Parece existir entre parte de los técnicos de carreteras la opinión de que para satisfacer las demandas de las autoridades medioambientales la mejor solución sería la de emplear por vía seca caucho en porcentajes sobre el peso de áridos de alrededor del 0,5% con granulometría por debajo de 0,5 mm. Se evitaría así el riesgo de deterioros prematuros de la mezcla por falta de digestión del caucho durante la fabricación y puesta en obra de la mezcla bituminosa, ya que con ese porcentaje y esa granulometría el tiempo de digestión es mínimo y está asegurado en cualquier obra. Pero debe decirse con claridad que no se consiguen en las mezclas bituminosas todos los beneficios propios de utilizar betunes caucho, y aquellos que se consiguen, de una forma muy limitada.

3. MEZCLAS BITUMINOSAS CON BETUNES DE BAJO CONTENIDO DE CAUCHO.

Estos betunes tienen unas características similares a las de los betunes modificados que habitualmente se emplean en España, particularmente con los del tipo BM-3a. Se trata de betunes con penetraciones entre 50 y 70 10^{-1} mm y temperaturas de reblandecimiento superiores a 58°C.

Debe recordarse que el caucho procedente de neumáticos está vulcanizado y por ello su integración dentro del betún presenta más dificultades que otros polímeros vírgenes. Dichos inconvenientes suelen atenuarse al emplear caucho de granulometría muy fina, por debajo de 0,5 mm. Incorporan cantidades de caucho que rondan el 10% del peso total de ligante, y suelen estar adicionados con un polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) u otro elastómero similar que mejore la estabilidad al almacenamiento.

Los betunes de bajo contenido de caucho pueden emplearse con cualquier granulometría de los áridos: continua, discontinua o porosa. El procedimiento de dosificación es el que habitualmente se emplee, puesto que se trata de un ligante bastante similar a los ligantes BM-3a. Por ejemplo, para dosificar un mezcla S-20 se empleará el procedimiento descrito con carácter general en el artículo 542 del PG-3; y si es un microaglomerado discontinuo el procedimiento señalado en el artículo 543 del PG-3. El contenido de caucho suele situarse en el 5% aproximadamente para granulometrías continuas, en el 5,7% para granulometrías discontinuas y 4,5% para mezclas porosas.

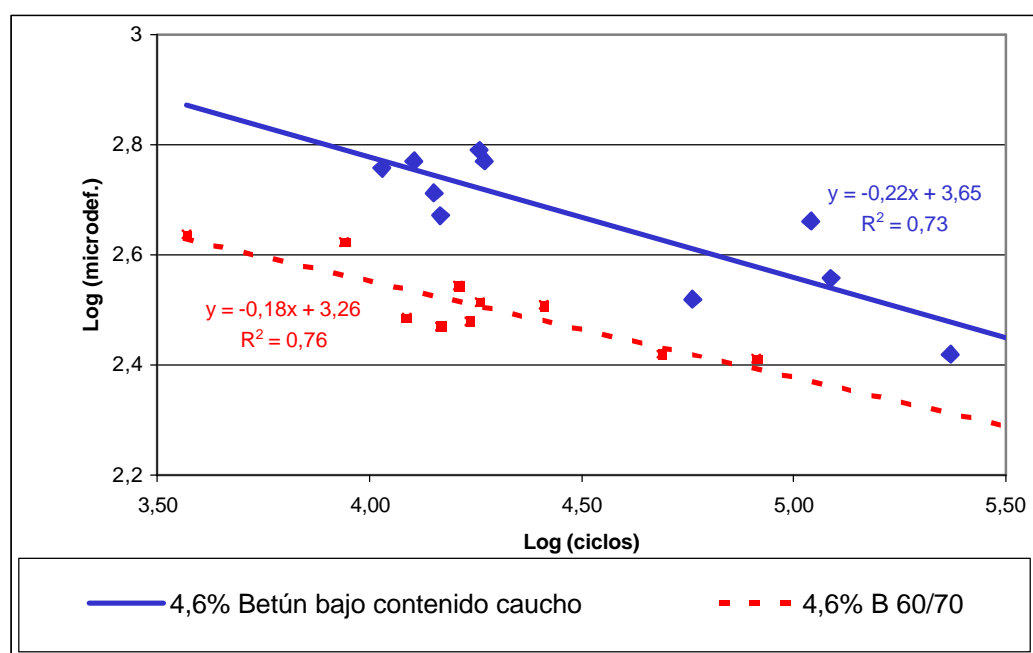
En cuanto a las características de las mezclas bituminosas se presentan a continuación algunos ejemplos, con los resultados obtenidos.

La tabla 1 presenta los resultados de Marshall, Inmersión Compresión, y Módulo dinámico de dos mezclas de granulometría S-20; la primera con un betún de bajo contenido en caucho y la segunda, utilizada como referencia, con un betún B 60/70 [1]. Se observa que la estabilidad Marshall con el betún caucho es algo superior. Ambas mezclas contenían un 4,6% de ligante s/áridos. La resistencia a las deformaciones plásticas, medida a través del ensayo de Pista de laboratorio, fue muy superior con el empleo del betún caucho, resultando una mezcla prácticamente indeformable, y poco sensible a los incrementos en el contenido de betún. El módulo dinámico disminuye con el empleo de caucho, como era de esperar. Este hecho y la mejora en la resistencia a la deformación plástica son ventajas, como se verá, comunes a todas las tecnologías de incorporación de caucho de neumáticos en la mezcla bituminosa.

Tabla 1. Mezcla S-20 con betún de bajo contenido de caucho [1]

		B 60/70	Betún-caucho
Marshall	Estabilidad (kN)	15,4	16,5
	Deformación (mm)	2,3	2,1
	H _m (%)	6,0	7,5
Inmersión-compresión	Res. conservada (%)	84	82
Pista de laboratorio	V ₁₀₅₋₁₂₀ (μm / min)	6	1,5
Módulo dinámico	MPa (a 20°C, 10 Hz)	6.450	5.230

Por otro lado la gráfica 3 muestra las leyes de fatiga obtenidas para las mezclas bituminosas referidas. El comportamiento a fatiga de una mezcla bituminosa con betún de bajo contenido de caucho es muy superior al de una mezcla con betún convencional. Ya se ha adelantado que en general estos betunes de bajo contenido de caucho funcionan aproximadamente como un betún BM-3a.



Gráfica 3. Mezcla S-20 con betún de bajo contenido de caucho y mezcla de referencia [1]

Del mismo modo podrían aportarse datos sobre mezclas bituminosas porosas o microaglomerados en caliente de granulometría discontinua fabricados con betunes de bajo contenido de caucho.

En general estas mezclas bituminosas son apropiadas para todas aquellas aplicaciones en las que se viene utilizando los betunes polímeros y por consiguiente tienen un gran campo de aplicación, sobre todo en capas de rodadura, sustituyendo a otros betunes modificados con polímeros, particularmente los del tipo BM-3a.

4. MEZCLAS BITUMINOSAS CON BETUNES DE ALTO CONTENIDO DE CAUCHO.

Los betunes de alto contenido de caucho incorporan aproximadamente un 20% de caucho en su peso, con una granulometría del caucho que puede llegar hasta 1,5 mm. Desde el punto de vista medioambiental estas circunstancias resultan favorables puesto que además de consumir más caucho éste puede estar dentro de un rango granulométrico más amplio.

No obstante, lo que más interesa aquí es la caracterización técnica de las mezclas bituminosas que se fabrican con betunes de alto contenido de caucho.

Sin duda el factor clave, que permite comprender el comportamiento de las mezclas con betunes de alto contenido de caucho, es el porcentaje de ligante que incorpora la mezcla bituminosa. Piénsese que generalmente una mezcla bituminosa contiene aproximadamente de un 4,5% a un 5,75% de ligante sobre el peso de los áridos. Éste es el caso también de los betunes de bajo contenido de caucho. Sin embargo, los betunes de alto contenido de caucho se dosifican entre el 8,5% y el 10,0% sobre el peso de los áridos. Es decir, que además de tener un alto contenido de caucho, también la mezcla bituminosa incorpora un alto contenido de ligante, casi el doble de lo que viene siendo habitual en la tecnología española de mezclas bituminosas.

Ello es posible gracias a la elevada viscosidad del betún de alto contenido de caucho. Medida a 175°C suele variar entre 3.000 y 5.000 cP. Considérese que a esta temperatura un betún modificado tiene aproximadamente entre 200 y 600 cP. Es precisamente la elevada viscosidad de los betunes de alto contenido de caucho, unido a unas penetraciones de alrededor de $30 \cdot 10^{-1}$ mm y temperaturas de reblandecimiento cercanas a los 80°C, lo que permite incorporar porcentajes muy altos de ligante en la mezcla bituminosa sin riesgos de deformaciones plásticas, es decir, de roderas.

Las granulometrías que se emplean deben disponer de huecos en áridos suficientes para albergar dichas cantidades de betún. Se emplean dos granulometrías: una discontinua, similar al monogranular español, y otra granulometría porosa, similar a la porosa española pero con menos finos –y menos huecos, debido a la abundancia de ligante-.

Para la dosificación, en el caso de la mezcla discontinua, se emplea el Marshall, en el que habrá de conseguirse una estabilidad superior a 8,5 kN y unos huecos en mezcla superiores al 5%. Se exige también el ensayo de Inmersión compresión, con la habitual exigencia de resistencia conservada del 75% al menos, y el ensayo de Pista de laboratorio, en el que se deben cumplir los requisitos habituales para mezclas de granulometría discontinua.

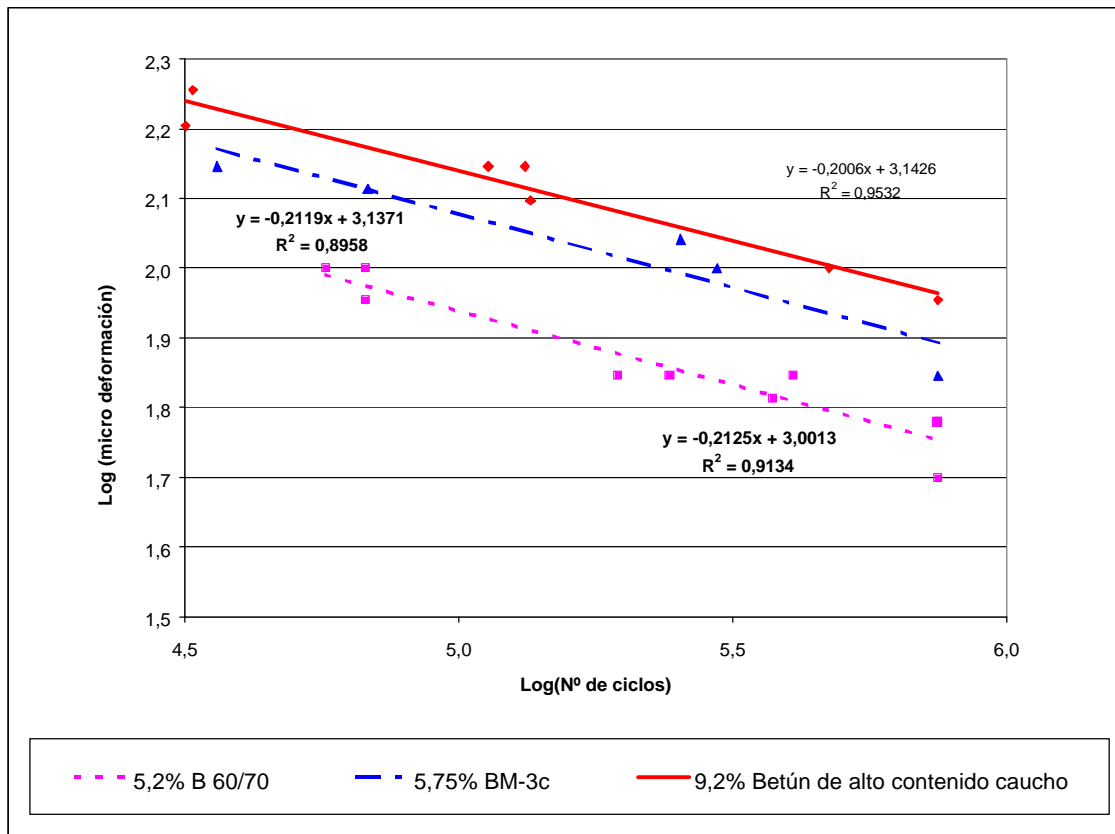
Estos márgenes suelen cumplirse sobradamente gracias, como se ha dicho, a la elevada viscosidad del ligante y también a la excelente adhesividad que le confiere la presencia masiva de caucho.

La tabla 2 presenta los resultados de los ensayos realizados a una mezcla de este tipo, fabricada y colocada en una autopista española en noviembre de 2002 [2]. La temperatura de fabricación de la mezcla fue de 175°C y la de compactación de 160°C, aproximadamente. El resultado de pista de laboratorio, quizás el más interesante, dado el contenido de ligante que se empleó (9,2% s/áridos), muestra que las mezclas con betún de alto contenido de caucho presentan una enorme resistencia a las deformaciones plásticas y a la formación de roderas, con niveles de deformación casi nulos, muy por debajo de los límites establecidos en el PG-3, característica ésta común a todas las tecnologías de incorporación de caucho.

Tabla 2. Mezcla con betún de alto contenido de caucho [2].

Marhall	Hm (%)	5,1
	Ha (%)	25,2
	Estabilidad (kN)	8,82
Inmersión compresión	Resist. Conserv. (%)	92
Pista de laboratorio	V ₁₀₅₋₁₂₀ (µm/min)	1,3
Módulo dinámico	MPa (a 20°C, 10 Hz)	4.821

Por otro lado, la resistencia a fatiga es excelente. La gráfica 4 muestra cómo una mezcla bituminosa con alto contenido de caucho dura el doble de ciclos que una mezcla con BM-3c, uno de los mejores betunes modificados que se emplean en España, y es muy superior al de una mezcla con B 60/70. Para que la comparación se establezca en su justa medida debe considerarse que el betún B60/70 se dosificó al 5,2%, y el BM-3c al 5,75%, mientras que el betún de alto contenido de caucho se dosificó al 9,2%, con lo que en parte la mejora a fatiga se debe al incremento de ligante en la mezcla. Pero es que precisamente en esto consiste lo esencial de las mezclas de alto contenido de caucho: que permiten unos contenidos de betún modificado que no pueden admitirse con los betunes de bajo contenido de caucho u otros betunes modificados porque se producirían deformaciones plásticas.



Gráfica 4. Mezcla con betún de alto contenido de caucho y mezclas de referencia.

Las principales aplicaciones de las mezclas con alto contenido de caucho se derivan de su flexibilidad y vida a fatiga. Se suelen utilizar en rodadura y son ideales cuando se prevén problemas de fisuración reflejada, como ocurre en pavimentos rígidos, semirrígidos o reciclados con cemento, y en general donde se deseen capas de rodadura muy durables.

5. CONCLUSIONES

De todo lo expuesto hasta aquí cabría establecer las siguientes conclusiones.

- Dentro de las técnicas de incorporación de caucho de neumáticos fuera de uso parece ser que en cuanto a resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas, los resultados más avanzados se consiguen con los betunes de alto contenido de caucho. A continuación vendrían los betunes de bajo contenido de caucho. En términos generales puede decirse que la resistencia a fatiga de la mezclas bituminosas con betunes caucho aumenta con el contenido de caucho y de ligante en la mezcla bituminosa.

- Las mezclas que incorporan el caucho por vía seca tienen un comportamiento que depende sobremanera del tiempo de *digestión* disponible en obra. Si se diseñan y se ponen en obra adecuadamente su comportamiento ofrece algunas mejoras sobre el de otras mezclas similares sin adición de caucho.
- Esta situación no significa en absoluto que deba descartarse ninguna de las tres tecnologías de incorporación de caucho, sino que en cada proyecto deberá seleccionarse la que mejor se acomode al problema que se pretende solucionar o prevenir en el pavimento, y a los precios que cada tecnología alcance en el mercado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] Gallego, J. (2001). *Mezclas bituminosas modificada por adición de polvo de neumáticos*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento. Madrid. ISBN 84-7790-363-8.

[2] Gallego, J., de los Santos, L. (2003). *Mezclas bituminosas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho. Aplicación al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7*. Revista de Obras Públicas, nº 34. Diciembre 2003. Madrid. ISSN 0034-8619.