

Emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso.

NFU-EMULSIONES

En España se generan más de 300.000 toneladas al año de neumáticos fuera de uso (NFU), sin contar el "stock histórico" estimado ya en más de tres millones de toneladas. Esta cifra ha llevado al Ministerio de Medio Ambiente a elaborar un Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso para contribuir en la disminución de dichas cantidades siempre que sea técnica y económicamente posible. En consecuencia, el Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) establece su posible uso en las mezclas bituminosas. Recientemente se han desarrollado los betunes modificados, mejorados o de alta viscosidad con caucho procedente de NFU, empleándose en carreteras como ligantes de iguales o mejores prestaciones que los betunes modificados con polímeros. Recientemente, es posible encontrar un nuevo ligante en el mercado que contiene NFU en su formulación, las emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso, NFU-emulsiones.

Palabras clave: NFU (neumáticos fuera de uso), emulsiones modificadas, sedimentación, estabilidad.

In Spain more than 300.000 tons of reclaimed tire rubbers (RTR) are generated per year, without taking into account the estimated historical stock in more than three million tons. These figures had brought to the Environment Ministry to elaborate a Jurisdiction National Plan about Tires Out of Use to contribute to reducing these amounts whenever it is technical and economically possible. Consequently, the General Fold of Technical Prescriptions for Works of Roads and Bridges establishes their possible use of the RTR in the bituminous mixes. Like this the modified bitumen, improved bitumen or the high viscosity modified bitumen with pulse of rubber have been developed recently. That are employed in roads like binding agent of equals contributions that the bitumen modified with polymers. And recently, it is possible to find a new binder in the market that contains RTR in its formulation, the emulsions modified with crumb rubber out of use, NFU-emulsions.

Key words: RTR (reclaimed tire rubber), modified emulsions, settlement, stability.

Nuria Querol Sola. nuria.querol@sorigue.com

Emeline Marty. emeline.marty@sorigue.com

Grupo Sorigué

Introducción teórica

Se define emulsión asfáltica como sistema heterogéneo formado por dos o más fases líquidas, una fase continua, agua,

y como mínimo una segunda fase líquida, betún, dispersada en forma de gotas.

Las emulsiones bituminosas son fluidos complejos. Su estabilidad depende de las fuerzas intermoleculares resultantes de las fuerzas atractivas y repulsivas que existen dentro de la estructura. Son sistemas termodinámicamente inestables, su inestabilidad se debe al aumento del área (ΔA) durante la emulsificación, que produce un incremento de la entalpía libre de Gibbs (ΔG):

$$\Delta G = \gamma \cdot \Delta A$$

Donde: γ = tensión interfacial

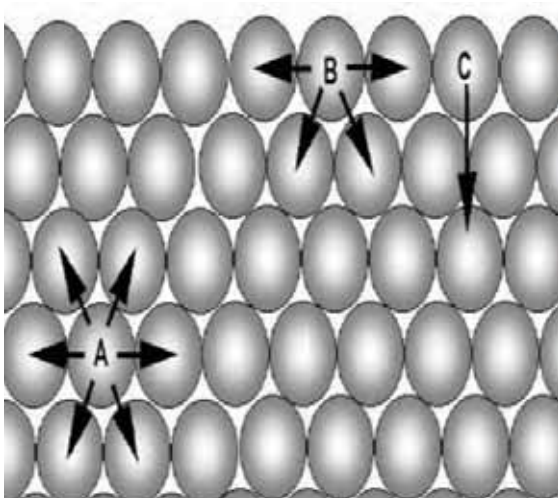


Foto 1: Representación grafica de las fuerzas intermoleculares resultantes en una estructura de una emulsión asfáltica.

La estabilidad de las emulsiones se puede clasificar en: reversible o irreversible.

1. Sedimentación reversible:

1.1 Cremado y sedimentación:

El betún tiene una densidad ligeramente superior que el agua, por lo tanto, por efecto de la gravedad las gotas tienden a orientarse al final del recipiente; es cuando se produce la sedimentación. Si añadimos un solvente al betún, este puede adquirir menor densidad que el agua y orientarse hacia la superficie, este fenómeno se conoce como cremado:

Podemos predecir esta velocidad de sedimentación a través de la ley de Stokes:

$$V = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 (\delta \text{ glóbulos} - \delta \text{ fase continua})}{9 \eta}$$

Donde,

V= velocidad final; m/s

r = radio de las partículas; m

δ glóbulos - δ fase continua = densidad fase dispersa y medio dispersante

g= aceleración de la gravedad; 9,8 m/s²

η = viscosidad del medio dispersante; (g/m/s)

Si δ glóbulos > δ fase continua $\rightarrow V > 0$ Sedimentación

Si δ glóbulos < δ fase continua $\rightarrow V < 0$ Cremado

Por lo tanto, el tamaño medio de una emulsión es directamente proporcional a la velocidad de sedimentación e inversamente proporcional a su viscosidad. Es decir, a menor tamaño medio, menor velocidad de sedimentación y mayor viscosidad para la misma concentración de betún asfáltico residual de la emulsión.

Resumiendo, la velocidad de sedimentación se puede reducir:

- Mejorando las condiciones de almacenado, manteniendo la emulsión a temperaturas bajas y/o agitando en periodos cortos de tiempo.
- Reduciendo la densidad del betún añadiendo un solvente.
- Previendo la floculación cambiando el tipo y la concentración de tensioactivo o cambiando el pH.
- Aumentando el contenido de betún.
- Aumentando la viscosidad de la emulsión.
- Disminuyendo el tamaño de partícula de los glóbulos.

1.2 Floculación

La floculación es un proceso en el cual las gotas empiezan a unirse unas a otras. Normalmente hay una gota central de tamaño mayor rodeada de pequeñas gotas. Por lo tanto, cuanto mayor homogeneidad tenga la emulsión menor floculación. Normalmente la floculación desaparece con agitación.

La velocidad de floculación disminuye al reducir la concentración de la fase dispersa y en menor proporción al disminuir la temperatura, ya que la energía cinética de los glóbulos se incrementa al aumentar la temperatura.

2. Sedimentación irreversible

2.1 Coalescencia

Cuando dos gotas se fusionan y forman partículas más grandes, la emulsión normalmente tiende a romper. Este efecto empieza con la floculación, pero no desaparece con agitación. Este efecto puede venir influenciado por el contenido de emulsionante, la elección de un mal emulsionante, utilización

de temperaturas erróneas durante el proceso de producción o almacenado... La velocidad de coalescencia depende de:

- La velocidad de floculación previa a la fusión de los glóbulos (por lo tanto, de la concentración de la fase dispersa).
- Las propiedades de la interfase (cargas eléctricas, características líquido cristalino)
- HLB (Balance Hidrofílico-Lipofílico) del emulsionante, composición química y concentración.

Fabricación de una emulsión con polvo de neumático

En el apartado anterior se ha querido enfatizar la importancia del tamaño de partícula de una emulsión en sus propiedades finales, así como la distribución granulométrica de estos tamaños, analíticamente llamado span.

El tamaño de partícula y la distribución de este tamaño se controlan con la formulación, los productos químicos utilizados, y sobre todo con el sistema de fabricación.

En un sistema convencional se utilizan molinos coloidales, de alto poder de cizalla donde se trabaja con un betún a baja viscosidad, 800 – 200 mPa.s a temperaturas de entre 120-140 °C, en régimen de trabajo turbulento, y una temperatura para la fase continua acida de 40-60 °C. Este sistema de fabricación limita la viscosidad final de la emulsión, el tamaño medio y máximo de partícula así como la concentración de betún final en la emulsión.

Los parámetros que van a influir en las características finales de la emulsión son:

Energía de dispersión:

La dispersión de una emulsión es causa de la energía mecánica y fisicoquímica aplicada. La energía mecánica, proporcionada por el molino divide el ligante en pequeñas partículas, la energía fisicoquímica viene dada por el emulsionante y debe:

- Reducir la tensión interfacial entre la fase hidrocarbonada (betún) y la fase acuosa (agua) para facilitar la emulsificación.
- Crear una película protectora alrededor de las partículas.

En otras palabras, tiene que haber suficiente energía mecánica para proveer las partículas de ligante de un tamaño y concentración correcta, así como suficiente tensioactivo para mantener la estabilidad de la emulsión.

Velocidad de corte:

Además de las materias primas utilizadas, la formulación, el tamaño y la distribución se controlan con el velocidad de corte.

El objetivo es mejorar la formación y distribución de las partículas de betún. Los tamaños finales que se consiguen dependen directamente del método de fabricación utilizado y se pueden expresar como:

$$\text{Velocidad de corte} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot V}{60 \cdot E}$$

Donde:

r = radio del molino (combinación entre rotor y estator);

V = velocidad de rotación (rad/s);

E = dimensión gap (distancia entre rotor y estator)

Con sistemas convencionales de fabricación, se limita el tamaño medio de partícula para emulsiones fabricadas en 5 – 10 µm, pero tamaños máximos de hasta 50 µm. Con el sistema utilizado se trabaja con betunes a alta viscosidad, superiores a 5.000 mPa.s y temperaturas bajas, alrededor de 100 °C, con muy baja velocidad de agitación. Con este sistema de fabricación, utilizando los mismos productos químicos, y semejante formulación se consiguen emulsiones de alta concentración de betún asfáltico residual, con un tamaño medio 1-2 µm, de muy baja polidispersidad, y gran estabilidad al almacenamiento, que admiten la incorporación de diferentes aditivos, como puede ser el polvo de neumático.

Diseño de la emulsión

Se realizan diferentes formulaciones con concentraciones de betún asfáltico residual que oscilan entre el 55 y el 62 % y concentraciones de caucho entre 1-6 %. Para su emulsificación se emplea un tensioactivo tipo diamina con una concentración entre el 0,4 % - 0,6 %. El caucho seleccionado, además de presentar una buena digestión con el betún, contiene una granulometría muy fina con un tamaño de partículas inferior a 400 µm y una baja densidad de tal manera que su dispersión en el betún ha sido muy efectiva.

Los resultados presentados en esta comunicación corresponden tan solo a la formulación, que por el momento, han presentado mejores resultados.

Emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso. NFU-Emulsiones

Parte experimental

1. Caracterización física de la NFU-Emulsión mediante los ensayos convencionales

Se realiza una primera caracterización físico-química de la emulsión basada en ensayos empíricos convencionales correspondientes al pliego de prescripciones técnicas. Estos se han comparado con los resultados de una emulsión tipo C60BP4 modificada con polímeros común en el mercado:

Tabla 1. Resumen de la caracterización físico-química inicial de la emulsión.

Características			NFU-emulsión	C60BP4
Ensayo	Norma	Unidad	Valor	
Emulsión original				
Betún asfáltico residual	NLT-139	%	60	59
Tamizado	NLT-142	%	0,30	0,04
Viscosidad Saybolt	NLT-138	s	130	48
Sedimentación	NLT-140	%	2	5

La NFU-emulsión presenta unos valores muy altos de tamizado, puesto que no todo el NFU se digiere en la matriz del betún y se queda retenido en el tamiz de 0.8 µm. Se trata de una emulsión muy viscosa, con valores de 130 s (poco más de 2 minutos) que casi triplican los de una emulsión convencional a mismo contenido de betún asfáltico residual.

Pero un parámetro importante a destacar, es su excelente valor de sedimentación, de tan solo el 2%, lo que significa que la emulsión es muy estable al almacenamiento. Por último destacar que se trata de una emulsión modificada con un residuo de betún asfáltico más duro que su homólogo, por las prestaciones que les confiere el NFU al betún.

Se evalúan también sus propiedades elásticas a través del ensayo de fuerza/ductilidad UNE-EN 13589 por ser una

emulsión modificada y los resultados obtenidos se observan en el siguiente gráfico:



Figura 1. Representación de la Fuerza (N) frente a la deformación (mm) correspondiente al ensayo de Fuerza/ductilidad.

Según la norma UNE-EN 13589: determinación de las propiedades de tracción de betunes modificados por el método de fuerza ductilidad y la norma UNE-EN 13703: Determinación de la energía de deformación se puede llegar a obtener un valor para la cohesión fuerza ductilidad a 5 °C según la fórmula siguiente:

$$E_i = n_i \cdot E_u$$

Donde:

n_i = número de unidades cuadradas.

$E_u = d_u \cdot F_u$

$$d_u = \frac{D}{V \cdot t}$$

D = elongación de la probeta

V = velocidad del papel de registro

t = tiempo necesario para realizar el ensayo

Tabla 2. Resumen de las energías de deformación para las diferentes muestras de emulsión.

EDEFORMACION	NFUEMULSION1	NFUEMULSION2	C60BP4
J/cm ²	0,406	0,563	≥ 1

Tamaño partícula	T mínimo d(0,1)	T medio d(0,5)	T máximo d(0,9)
μm	1,980	4,004	7,982

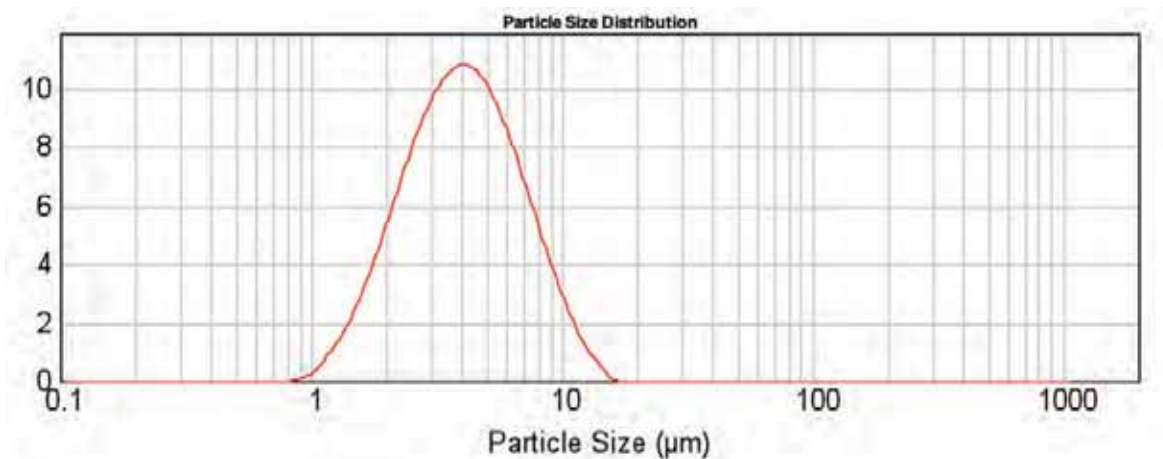


Figura 2: Granulometría de la emulsión modificada con polvo de neumático fuera de uso.

Los valores de energía están por debajo de los exigidos para una emulsión C60BP4 convencional si bien, la cantidad de NFU que contenían estas muestras era inferior a la cantidad de polímero equivalente que contiene una emulsión C60BP4.

2. Determinación del tamaño de partícula

Se determina también, el tamaño de partícula de estas emulsiones por ser un parámetro muy importante como ya hemos comentado anteriormente. Para su determinación granulométrica se utiliza la técnica de difracción láser.

Como se puede observar en la siguiente tabla el tamaño medio de partícula de esta emulsión se encuentra en 4 μm, y el tamaño máximo en tan solo 8 μm.

Estos resultados concuerdan con los excelentes valores de sedimentación presentados anteriormente, puesto que según la ley de Stokes, a menor tamaño medio de partícula menor velocidad de sedimentación.

3. Estudio de sedimentación

Finalmente, se dedica una especial atención al estudio de sedimentación, por ser una característica difícil de superar en los ligantes que contienen polvo de neumático fuera de uso en su formulación. Para ello se desarrollan dos métodos:

3.1. Método convencional a través de la norma NLT-140

En este caso se obtiene, como ya se ha comentado anteriormente, valores del 2% de sedimentación, valor que hace pensar que la fórmula empleada para la fabricación de estas NFU-emulsiones es adecuada y permite obtener una emulsión modificada con polvo de caucho muy estable en el tiempo.

3.2. Sedimentación A: Estudio cualitativo y cuantitativo

Para poder analizar la dispersión del polvo de caucho en el seno de la emulsión así como comprobar la tendencia a la sedimentación de la NFU-emulsión, se utilizan dos tubos tipo tubo de "pasta de dientes", empleados para estudiar la estabilidad de los betunes modificados con polímero. En cada uno se introducen 150 ml de emulsión y se dejan durante siete días a temperatura ambiente como si se tratase del ensayo de sedimentación clásico. Transcurrido este periodo de reposo, los dos tubos se introducen en un congelador a una temperatura de -20 °C durante 24 horas. Se corta uno de los dos tubos por la mitad con la finalidad de evaluar visualmente la dispersión del caucho mientras el segundo se corta en tres partes.

Para determinar el grado de homogeneidad del ligante se elimina primero el agua por evaporación a una tempera-

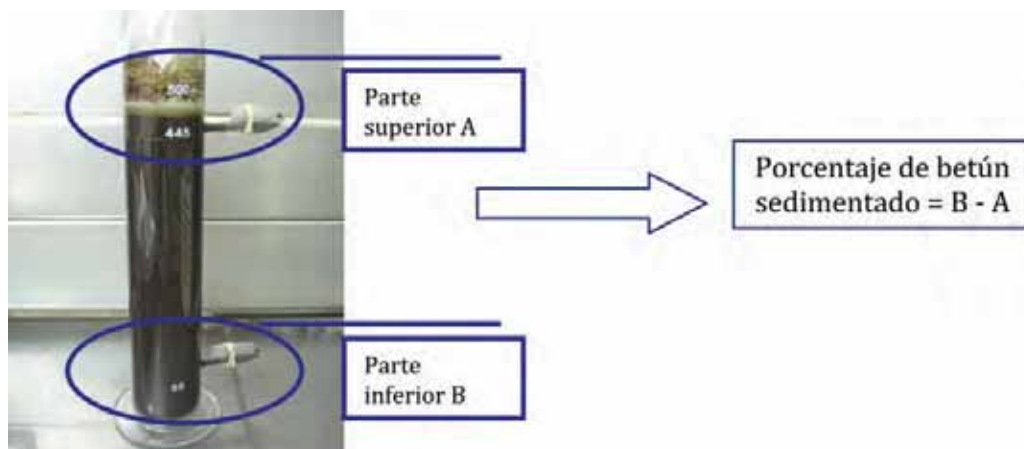


Figura 3: Probeta de sedimentación para emulsiones bituminosas

tura de 50 °C y se controla por pesada la pérdida de agua hasta obtener un peso constante. Una vez completada la evaporación de agua se extrae el caucho con el tetrahidrofurano, con una proporción de 50 ml por 1 g de betún residual, y se determina el porcentaje de NFU en cada una.

Como se ha precisado antes, después de dejar en reposo la emulsión los siete días a temperatura ambiente y puesto a -20 °C, la distribución del caucho se evalúa de dos maneras distintas:

1) Ensayo cualitativo:

Se trata de una inspección visual de la distribución del NFU en el seno del betún.

Para ello se parte el tubo de dientes por la mitad y se observa la distribución del caucho.



Figura 4: Evaluación visual de la dispersión del caucho en el seno de la emulsión.

2) Ensayo cuantitativo

En este caso, se corta el tubo en tres partes con la finalidad de determinar tras la evaporación completa del agua y una extracción con THF (tetrahidrofurano) la cantidad polvo de neumático fuera de uso en cada una de las partes.



Figura 5: Método de análisis de la dispersión de NFU en la emulsión.

Los porcentajes de caucho obtenidos para cada fracción han sido los siguientes:

Tabla 3: Resumen del % de caucho obtenido con el THF en cada fracción.

Parte del tubo		% de NFU
Caso	Alta	3,6%
	Intermedia	3,5%
	Baja	4,2%

Como se puede ver, la distribución del NFU es bastante homogénea, los tres valores obtenidos son muy similares y demuestran una perfecta distribución del NFU en el volumen de la emulsión apoyando así la evaluación visual precedente y la excelente estabilidad determinada gracias al ensayo de sedimentación de la NFU-emulsión.

4. Caracterización reológica del ligante residual de la NFU-emulsión

Los betunes son materiales viscoelásticos, es decir, al someterlos a una fuerza, la respuesta del material se traduce en dos componentes: una elástica, donde al retirarse la fuerza se recupera parte de la posición inicial, y otra viscosa, donde la deformación es permanente. Este comportamiento es función de la temperatura y de la carga aplicada. Así, para caracterizar correctamente un betún debemos medir al menos dos de sus propiedades: la resistencia del material a la deformación y su distribución entre sus componentes elástica y viscosa. La forma experimental de medir este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación donde se utiliza un reómetro de corte dinámico (DSR) según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 14770 – Determinación del módulo complejo y del ángulo de fase por medio de un reómetro de corte dinámico. Este equipo permite evaluar el comportamiento viscoelástico de los ligantes a través de la medida del módulo complejo G^* , indicador de la relación entre la carga aplicada y la deformación medida, y del ángulo de fase, δ , referencia a la deformación recuperable y no recuperable, para los tres estados críticos del ligante.

Para estudiar el comportamiento del ligante podemos estudiar tres áreas críticas de temperatura e intentar correlacionarlas con las propiedades finales del ligante:

- $T > 100\text{ }^\circ\text{C}$: Los betunes se comportan como fluidos newtonianos. La medida de la viscosidad es suficiente para evaluar su trabajabilidad. Esta es independiente del tiempo de carga aplicado.
- $45 > T < 85\text{ }^\circ\text{C}$: Los fallos en el pavimento son causados mayoritariamente por deformaciones plásticas. Es necesario medir G^* y δ para conocer su comportamiento. Cuanto mayor sea G^* , mayor resistencia a la deformación, por lo tanto menor fallo por deformaciones plásticas; y cuanto menor sea δ , mayor comportamiento

elástico del ligante, por tanto menor fallo a deformaciones plásticas. Estos fallos son función de la carga aplicada, por lo tanto, debe considerarse el estudio a tiempos de carga rápidos, que se traducen en medidas realizadas a 10 rad/s, que son equivalentes a velocidades de 75-90 km/h.

- $0 > T < 45\text{ }^\circ\text{C}$: En este caso, los fallos en el pavimento son causados mayoritariamente por fallos a fatiga causada por la repetición de ciclos de carga. A dichas temperaturas los betunes son más duros y menos elásticos. Nuevamente debemos medir G^* y δ , pues el daño producido será función de cuanta deformación se produce y cuanta de esa deformación es recuperable. Los resultados serán también función del tiempo de carga, por tanto debemos realizar los ensayos a 10 rad/s, es decir 1,59 Hz.

Además de los criterios SUPERPAVE utilizados para evaluar el comportamiento de los diferentes ligantes a las deformaciones plásticas y fatiga, se realiza un barrido de frecuencia de las muestras entre 0,01 y 10 Hz a dos temperaturas de ensayo: 25 °C y 58 °C para estudiar la variación de módulos a cargas lentas y rápidas.

Se analiza el betún residual de la NFU-emulsión y se compara con el ligante residual de una emulsión modificada con polímeros, y como referencia se representan también los resultados de betún modificado con polvo de caucho (BMC-3b), un betún modificado con polímero (BM-3b), que sería el que mayor comportamiento elástico debería presentar.

Todos los ligantes han sido caracterizados en su estado original. Los resultados obtenidos se representan a través del diagrama de Black, variación del módulo complejo, G^* ; con la variación del ángulo de fase, δ , y variación del módulo en función de la frecuencia.

En el diagrama de Black se observan bien dos comportamientos claramente diferenciados: un comportamiento lineal, consecuencia de la escasa contribución elástica, y un comportamiento en forma de S, típico de los ligantes que contienen polímeros, debido a la interacción del comportamiento elástico del polímero y el comportamiento viscoelástico del ligante modificado. En el siguiente gráfico queda representado el comportamiento de estos cuatro ligantes.

Se observa que el ligante que mayor comportamiento elástico presenta, curva en S, es el correspondiente al betún modifica-

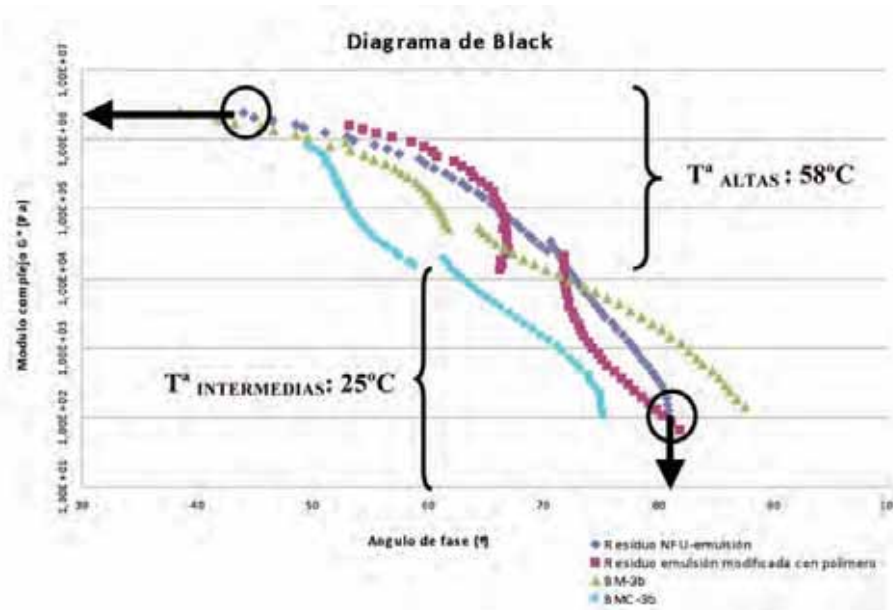


Figura 6: Diagrama de Black de los cuatro ligantes estudiados.

do con polímeros, representado en color verde, seguido del betún modificado con polvo de neumático fuera de uso, color azul, y el residuo de la emulsión modificada con polímeros, color granate. Por último, el ligante con menor comportamiento elástico es el correspondiente al residuo de la emulsión con polvo de neumático, ya que la cantidad de caucho incorporada es todavía muy pequeña para que esta propiedad pueda ser significativa.

También se puede ver claramente la diferencia de comportamiento viscoelástico entre los diferentes ligantes. A altas temperaturas, el ligante que presenta mayores valores de G^* , es decir mayor resistencia a la deformación, es el correspondiente al betún modificado con polímeros, pero cabe observar que el valor del betún residual de la NFU-emulsión es prácticamente el mismo. Mientras que a temperaturas intermedias, el menor valor de δ , comportamiento más elástico, corresponde al betún modificado con caucho, seguido por el residuo de la NFU-emulsión que contendría el mismo valor que el residuo de la emulsión modificada con polímeros.

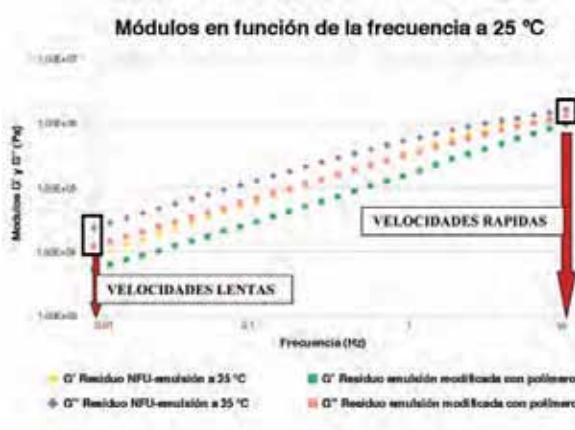


Figura 7: Módulos elásticos y viscosos en función de la frecuencia del residuo de una emulsión modificada con polímero y del residuo de la NFU-emulsión a 25°C.

En el gráfico siguiente se representan los módulos G' (contribución elástica) y G'' (contribución viscosa) a temperatura intermedia, 25 °C, en todo el rango frecuencia para el residuo de la NFU-emulsión y para el residuo de una emulsión modificada con polímeros. Los dos residuos tienen un comportamiento mayormente viscoso, pues los valores de G'' se encuentran en todo el rango de frecuencias por encima de los valores de G' . Para cargas lentas, frecuencias de 0,01 Hz, el residuo de la NFU da valores inferiores, es decir, peor comportamiento a fatiga, si bien, para cargas rápidas, frecuencias de 10 Hz, ambos ligantes tienen comportamientos similares.

Conclusiones

1. Existe una nueva generación de emulsiones modificadas formuladas con polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, estables al almacenamiento.
2. Los ensayos de caracterización físico-química iniciales permiten apreciar las características de este ligante comparables con una emulsión modificada con polímeros común del mercado. Cabe destacar los excelentes valores obtenidos en el ensayo NLT-140 correspondientes al ensayo de sedimentación.
3. El ensayo de fuerza ductilidad UNE-EN 13589 muestra que se trata de una emulsión con un alto valor de cohesión si tenemos en cuenta que la cantidad de caucho que contiene está muy por debajo de la cantidad de polímero utilizado para formular una emulsión modificada.
4. Los resultados del ensayo cualitativo junto con los del ensayo cuantitativo con THF ratifican los excelentes valores obtenidos en el ensayo de sedimentación.
5. Según el diagrama de Black el comportamiento elástico de la NFU-emulsión es muy poco significativo comparado con una posible emulsión homóloga C60BP4, pero la cantidad máxima de caucho que se puede incorporar en estas emulsiones está todavía por determinar y esta propiedad puede variar significativamente. Para temperaturas altas, 58 °C, el valor de G^* para el residuo de la NFU-emulsión es prácticamente igual al de la emulsión modificada con polímeros. Y para temperaturas intermedias, 25 °C, el valor de G^* es igual para los dos ligantes anteriormente mencionados.
6. En el barrido de frecuencias, para velocidades lentas, el residuo de la emulsión modificada con polímeros presenta mejores resultados, pero para cargas rápidas los valores de G^* son iguales para los dos ligantes.

Con la puesta a punto de la formulación de la última generación de emulsión modificada con polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso, SORIGUÉ consigue unir las ventajas de la utilización de las emulsiones en la construcción de carreteras a las ventajas aportadas por el ligante modificado con caucho con un compromiso medioambiental importante colaborando con este nuevo ligante en su reutilización, revalorización y eliminación de este residuo.

Referencias

- [1] CEDEX. Mayo 2007. Ministerio de Medio Ambiente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas
- [2] Colás Victoria, M^a Mar, et al. 2008. Reología de los betunes con caucho, VIII Congreso Nacional de firmes.
- [3] Dupon. 2009: Invention et évolution des pneumatiques, www.moto-histo.com/pneus/pneus.htm.
- [4] ISO 13320: Diciembre 2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods.
- [5] K. Van Nieuwenhuyze, et al. March 2001. "Understanding the relationship between emulsion properties and binder/emulsifier characteristics." European Research project. Cold Mix Technology. Revue Générale des Routes et des Aérodrômes número 793.
- [6] L. Bonakdar, J. et al. 2001 "Rupturing of bitumen-in-water emulsions: experimental evidence for viscous sintering phenomena." Paper accepted for publication in Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects 176. P.185-194.
- [7] NLT – 138. 1999. Viscosidad Saybolt de las emulsiones bituminosas,
- [8] NLT – 140 Octubre 2009. Sedimentación de las emulsiones bituminosas, [10] UNE-EN 12847: Determinación de la tendencia a la sedimentación de las emulsiones bituminosas,
- [9] Potti, J. J. Enero-.Febrero 2005: Innovaciones en ligantes bituminosos, Revista CARRETERAS, núm. 138,
- [10] Potti, JJ. Septiembre-Octubre 1999. "Emulsiones catiónicas de rotura lenta en carreteras. Primeros resultados del proyecto Europeo Optel". Revista "Carreteras" número 103 páginas 81- 97.
- [11] Samaraez 2008. Chemical Consulting: Reciclaje de neumáticos fuera de uso – Trituración mecánica.
- [12] UNE-EN 1429. Octubre 2009.: Determinación del residuo por tamizado de las emulsiones bituminosas, y determinación de la estabilidad al almacenamiento por tamizado,
- [13] Y. Lendresse, et al. 7 -10 May 1996 "The performance of emulsion-grade bitumens. The use of a new method for characterising their interfacial properties, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg (France),, Paper nº 6.038.