

Influencia de la temperatura de mezcla en las propiedades mecánicas de los reciclados en frío con emulsión

Los reciclados de firmes in situ con emulsión (RFE) constituyen una técnica de rehabilitación de carreteras con un gran atractivo económico y medioambiental, debido a su bajo consumo de materias primas constituyentes, reducidos consumos de energía y baja generación de emisiones y ausencia de residuos. No obstante, presentan una serie de inconvenientes que limitan su aplicación, ligados a: la necesidad de un periodo de curado inicial antes de su puesta en servicio o extensión de otra capa superior de mezcla bituminosa, y a unas prestaciones iniciales, mecánicas y cohesivas, muy inferiores a las que presentan a posteriori, a medio y largo plazo. En este trabajo se presentan los estudios que demuestran la influencia determinante en las mejoras antes citadas que tiene una nueva variable a tener en cuenta, la temperatura de la mezcla en el momento de su puesta en obra y compactación. Esta variable determina las características de la mezcla, en cuanto a prestaciones mecánicas, cohesión y compactación, tanto iniciales como las obtenidas finalmente, a lo largo de su periodo de maduración. Con ello, se puede establecer un nuevo parámetro en la ejecución de cada formulación de reciclados a edad temprana, cual es la temperatura de puesta en obra de la mezcla en el momento de la compactación, por encima de la cual las prestaciones buscadas en el reciclado estarían aseguradas. En este estudio se pone de manifiesto la evolución de las propiedades de las mezclas de reciclado con el tiempo, al mismo tiempo que la misma mezcla compactada a distinta temperatura presenta diferentes propiedades y que la adición de aditivos influye directamente en las características mecánicas (compactación, módulos y cohesión) de los diferentes tipos de reciclado formulados.

Palabras clave: Reciclado, frío, emulsión, propiedades, temperaturas y aditivos.

Cold In Place Recycling constitutes a road rehabilitation technique with a great economic and environmental attractive due to its low consumption of raw materials and energy and low level of emissions and absence of residua. However, it shows some disadvantages that in practice are a limitation to its applications. Among them are the needs of initial long times before putting on service the treatment or lying the upper course and properties after a long time of use lower than those of the corresponding hot treatment. In this work we carry out some studies that demonstrate the strong influence of the mix temperature during laying and compaction. This variable determines the final characteristics of the mix linked to its mechanical behavior, cohesion and compactness both in the initial stages and during its maturation period. After the results obtained, the temperature of lying and compaction can be established as a new parameter to take into account in the paving of each formulation of cold recycling. It is necessary to reach a minimum value of the temperature to assure the mechanical behavior. This work shows the evolution with time of the properties of the recycled mixture and the direct influence of different additives in its final characteristics.

Key words: Recycling, cold, emulsion, property, temperatures and additives.

Francisco Guisado Mateo,
Sacyr, fguisado@gruposyv.com

Jacinto Luis García Santiago,
Sacyr, jsantiago@gruposyv.com

Antonio Paez Dueñas
Repsol, apaezd@repsol.com

Mercedes Ayala Canales
Repsol, mayalac@repsol.com

1. Introducción

El reciclado in situ en frío con emulsión (RFE) presenta la limitación de que es necesario que transcurra un período de curado más o menos extenso entre su ejecución y la extensión de las capas de mezclas de refuerzo y/o rodadura superiores. Este aspecto supone una seria limitación para su uso. Con la técnica habitual, el período de maduración necesario (mínimo 2 semanas en condiciones óptimas) y la baja capacidad mecánica a cor-

Influencia de la Temperatura de Mezcla en las Propiedades Mecánicas del RFE

to plazo, con bajos módulos iniciales, no permiten, ni hacen aconsejable, anticipar la colocación de la capa de mezcla bituminosa en caliente de refuerzo y rodadura, tanto por la previsible deformación del perfil final por la postcompactación de la capa de reciclado como la disminución de la vida a fatiga de la capa de mezcla bituminosa en caliente que se produciría en esos estadios iniciales con soporte tan flexible.

Para paliar estas limitaciones, se puso en marcha un programa de investigación que permitiera disminuir los tiempos en que se alcanza la cohesión final de la mezcla. Fruto de ese trabajo se puso a punto el Reciclado en Frío con Emulsión de Altas Prestaciones Iniciales (RFE. API), mediante la utilización de un aditivo hidráulico para eliminar el agua de la emulsión y un aditivo acelerador de curado, con lo que se conseguía un aumento significativo de la cohesión inicial, de tal forma que se podían extender las capas superiores en caliente en tiempos no superiores a 96 h. Como continuación de los estudios para el incremento de la cohesión de los reciclados en frío, junto a este tipo de formulación se han estudiado otros dos tipos de reciclados en frío con emulsión, reciclado en frío mejorado y reciclado en frío convencional, para evaluar el papel de la temperatura de compactación y aditivos en el comportamiento de los diferentes reciclados.

Se trata de establecer la influencia de la temperatura de compactación en la compactibilidad y en las propiedades mecánicas de las mezclas recicladas en frío con emulsión (RFE).

2. Influencia de la temperatura de compactación de la mezcla reciclada en sus propiedades. Planteamiento de estudio y objetivos

La experiencia acumulada en obras de reciclado en frío puso de manifiesto que la temperatura podría ser un parámetro adicional en el diseño y control de ejecución de la mezcla reciclada. Por ello, en las últimas obras ejecutadas por nuestra parte, se comenzó por controlar la temperatura de la misma y su evolución a lo largo de la jornada por efecto de la insolación.

Del estudio de los datos obtenidos durante la ejecución y resultados de los testigos de las obras ejecutadas, se vio que la temperatura podría ser un parámetro a tener en cuenta, no sólo en los valores iniciales de cohesión y módulo, sino también en su evolución y valores finales. Por lo cual se planteó un nuevo estudio para conocer la influencia de la temperatura de compactación en la compactibilidad y en las propiedades mecánicas de las mezclas recicladas en frío con emulsión.

El objetivo principal es observar la influencia de la temperatura de la mezcla reciclada durante su compactación, dentro del rango de "reciclado en frío", por lo que las temperaturas de mezclado y compactación seleccionadas han sido: 10, 20, 30 y 40 °C.

3. Tipos de mezcla reciclada en frío fabricada, compactada y estudiada

Las mezclas estudiadas se basaron en el reciclado en frío de altas prestaciones iniciales del enlace de Villablino, en la autopista AP-66, ejecutada en junio de 2007. A partir del cual se estableció la misma humedad y el mismo óptimo de emulsión para los tres tipos de reciclados, se fijó la misma cantidad de aditivo hidráulico para los dos tipos de reciclados que lo poseían en su dosificación y se fijó la misma cantidad de aditivo no hidráulico para el tipo de reciclado en que se basó la obra antes mencionada. Con los tres tipos de reciclados, además de la temperatura como factor fundamental a estudiar, se introduce otro factor a tener en cuenta, la presencia de aditivos, influyendo ambos significativamente en las propiedades de los reciclados en frío con emulsión.

Tabla 1. Granulometría de los áridos recuperados y contenido ligante.

Tamiz UNE, mm	% Pasa
25	100
20	100
12,5	92
8	76
4	53
2	36
0,5	17
0,25	13
0,125	10
0,063	7,1
Contenido Ligante	%
s/m	3,60
s/a	3,73

En la tabla 1 se indica la granulometría de los áridos recuperados y el contenido de ligante del fresado empleado.

La emulsión empleada y la que se ha empleado en el estudio fue una emulsión catiónica lenta blanda tipo dos con un ligante residual rejuvenecedor (ECL2b Rejuvenecedora) con una penetración de 200 – 250 dmm.

En la siguiente tabla se indican las dosificaciones de los componentes de los diferentes reciclados estudiados:

Tabla 2. Dosificación de los RFE

	RFE. API	RFE Mejorado	RFE Convencional
Fresado	100 %	100 %	100 %
Emulsión	4 %	4 %	4 %
Agua	2 %	2 %	2 %
Cemento	1,5 %	1,5 %	--
Aditivo	< 1 %	--	--

Las condiciones de fabricación y compactación en el laboratorio fueron las mismas para los tres tipos de reciclados y que se indican en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones compactación giratoria

Procedimiento	UNE EN 12697-31, compactadora giratoria
Presión contacto	600 KPa
Velocidad giro	< 0,53 Hz
Angulo de giro	1,12 mrad
Energía compactación	180 ciclos

4. Esquema de desarrollo para la fabricación de las probetas para el estudio de laboratorio

Como herramienta de compactación se ha usado la compactadora giratoria (según UNE EN 12697-31), elegida porque se obtienen mezclas compactadas semejantes a las que se obtienen en obra. Además, es la forma de compactar más adecuada para estudiar este tipo de mezclas. Se han establecido las mismas condiciones de compactación para todas las probetas fabricadas a nivel de laboratorio: tipo de compactación,

energía de compactación, número de giros, presión, ángulo y velocidad de giro.

Una vez finalizada la compactación del reciclado en las condiciones previas establecidas (Foto 1), las probetas se guardan directamente en la cámara climática (Foto 2) para un proceso de curado a 20 °C.

5. Ensayos mecánicos utilizados

Para observar la evolución de las propiedades de la mezcla con el tiempo y la temperatura de compactación, se han realizado los ensayos sobre las probetas fabricadas a los siguientes tiempos de curado: 24, 48, 72, 96 y 168 horas.

Los ensayos realizados sobre las mismas han sido:

1. Módulo de rigidez a tracción indirecta, según la norma UNE EN 12697-26, Anexo C, a 20 °C.
2. Resistencia a Tracción Indirecta (RTI), mediante compresión diametral hasta su rotura, como establece la norma de ensayo UNE-EN-12697-23, a una temperatura de ensayo de 15 °C.



Foto 1. Compactación giratoria.



Foto 2. Curado de probetas.

Influencia de la Temperatura de Mezcla en las Propiedades Mecánicas del RFE



Foto 3. Módulo rigidez.

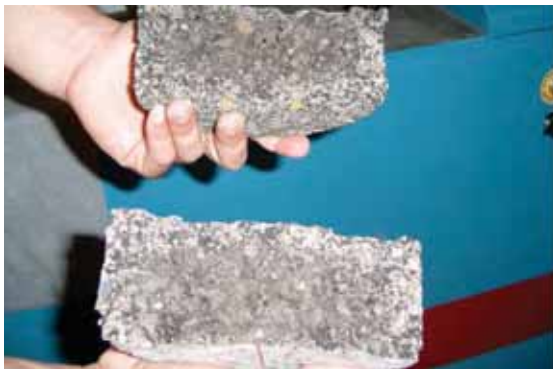


Foto 4. Probeta rota a tracción indirecta.



Foto 5. Ensayo tracción indirecta.

3. Con las probetas rotas a tracción indirecta se procedió a medir la humedad de las mismas a cada tiempo de curado, mediante secado en estufa según NLT – 102.

6. Resultados mecánicos de las mezclas estudiadas

6.1. Densidad volumétrica en función de la temperatura de compactación

En la siguiente figura se muestran los resultados, de manera comparativa, de la densidad obtenida después de compactación, utilizando las mismas condiciones de ensayo de compactación de las tres mezclas.

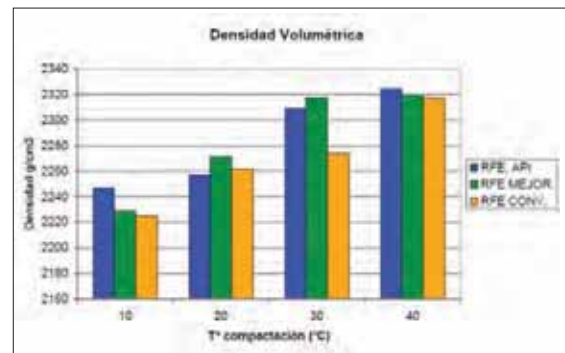


Figura 1. Comparativa de densidades obtenidas de los tres tipos de RFE.

Como puede observarse, a medida que aumenta la temperatura, aumenta la densidad. Este aumento parece lineal hasta los 30 °C, mientras que a 40 °C la subida parece decelerarse. En todos los casos, tanto el reciclado en frío de altas prestaciones iniciales como el reciclado en frío mejorado presentan mayor densidad que el reciclado en frío convencional, lo que muestra la eficacia del cemento para eliminar agua del sistema.

6.2. Módulo de rigidez a tracción indirecta frente a la temperatura de compactación

En las siguientes gráficas (figuras 2 a 4) se representan la evolución del módulo de rigidez a tracción indirecta de los tres tipos de reciclados según el tiempo de curado, a las tres temperaturas de mezcla y compactación estudiadas.

Como puede observarse, aumenta el módulo de rigidez a tracción indirecta según se aumenta la temperatura de la

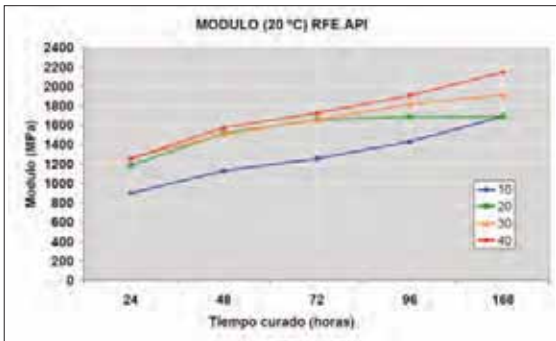


Figura 2. Módulo RFE. API. vs. tiempo curado.

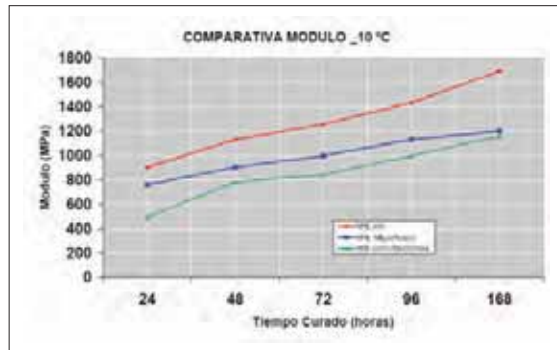


Figura 5. Comparación de módulo a 10 °C.

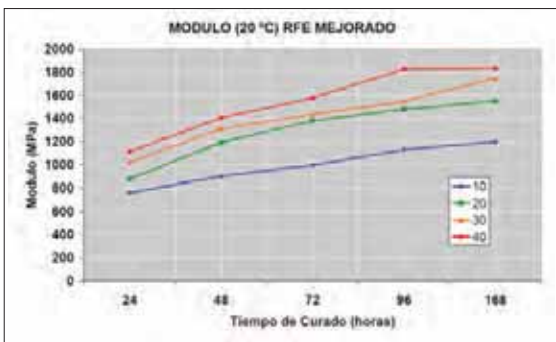


Figura 3. Módulo RFE. Mejorado vs. tiempo curado.

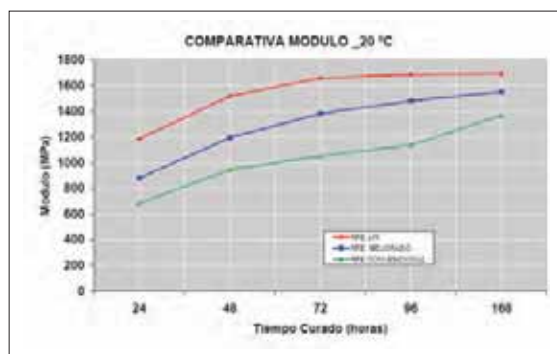


Figura 6. Comparación de módulo a 20 °C.

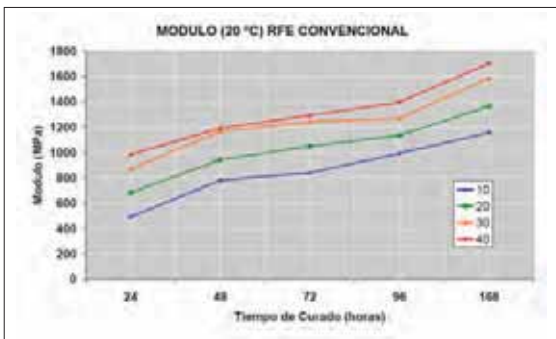


Figura 4: Módulo RFE convencional vs. tiempo curado.

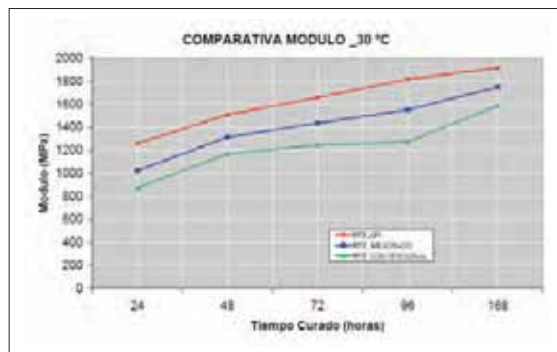


Figura 7: Comparación de módulo a 40 °C.

mezcla. Además sus valores se diferencian a medida que las mezclas van madurando con el tiempo. Y existe una diferencia significativa entre los 10 °C y las demás temperaturas.

Si comparamos los resultados obtenidos de todas ellas, el reciclado de altas prestaciones muestra mejores valores a cualquier temperatura de compactación y tiempo de curado, siendo muy superiores al convencional y superiores al mejorado con las mismas cantidades de emulsión, agua y cemento, lo cual indica la capacidad de los aditivos de acelerar las propiedades de curado.

En las siguientes gráficas (figura 5, 6 y 7) se compara la evolución del módulo de los tres reciclados estudiados:

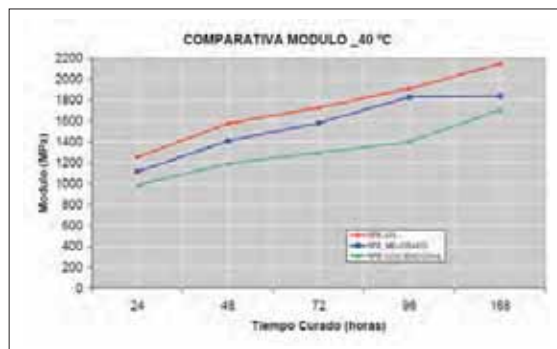


Figura 8: Comparación de módulo a 40 °C.

Influencia de la Temperatura de Mezcla en las Propiedades Mecánicas del RFE

Según aumentan las temperaturas de la mezcla y de compactación, aumentan los resultados mecánicos de las propiedades consideradas en cualquiera de las mezclas estudiadas, observándose que a los primeros días de vida las propiedades mecánicas se diferencian claramente.

El incremento de las propiedades mecánicas es mucho menor entre 20, 30 y 40°C que entre 10 y 20°C, pudiéndose observar un "gap" muy significativo entre 10 y 20°C. Esta diferencia es independiente del tipo de reciclado en frío de que se trate.

Por lo tanto, los resultados experimentales parecen indicar que la temperatura mínima de compactación del reciclado en frío debería fijarse en 20°C, ya que por debajo de esta temperatura las propiedades mecánicas son muy inferiores a las obtenidas a partir de la misma.

Además en todos los casos, y a todos los tiempos de curado, el reciclado en frío con emulsión de altas prestaciones iniciales, presenta mejores propiedades que el reciclado en frío mejorado y éste mejores que el reciclado en frío convencional.

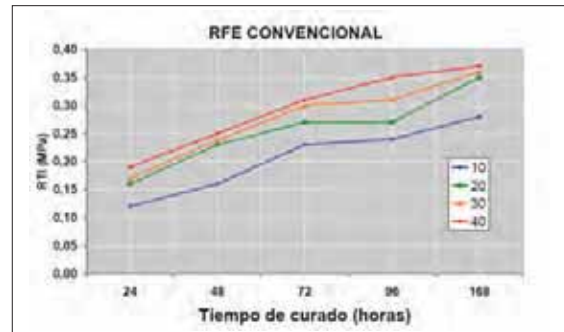


Figura 11. Resistencia a tracción indirecta vs. tiempo curado a cada temperatura compactación del reciclado convencional.

6.3. Resistencia a tracción indirecta frente a la temperatura de compactación

En las siguientes gráficas (figura 9 a 11) se observa la evolución de la resistencia a tracción indirecta (RTI) de los tres tipos de reciclados según el tiempo de curado a las temperaturas establecidas.

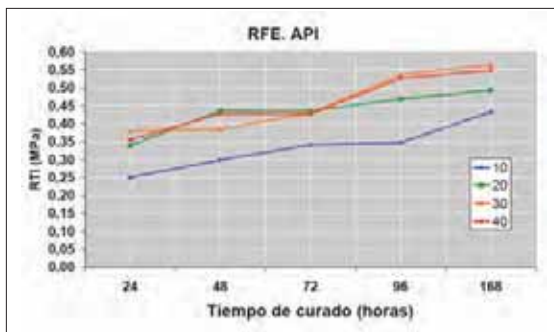


Figura 9. Resistencia a tracción indirecta vs. tiempo curado a cada temperatura compactación del RFE API.

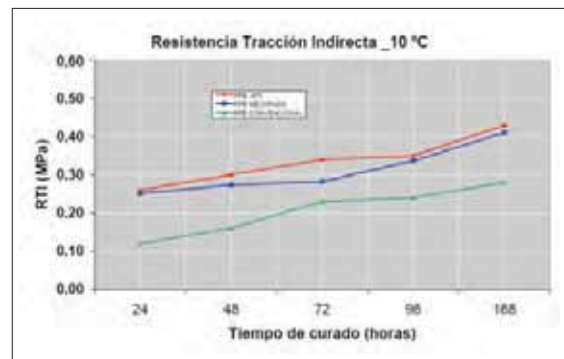


Figura 12. Comparación de RTI a 10 °C.



Figura 10. Resistencia a tracción indirecta vs. tiempo curado a cada temperatura compactación del reciclado mejorado.

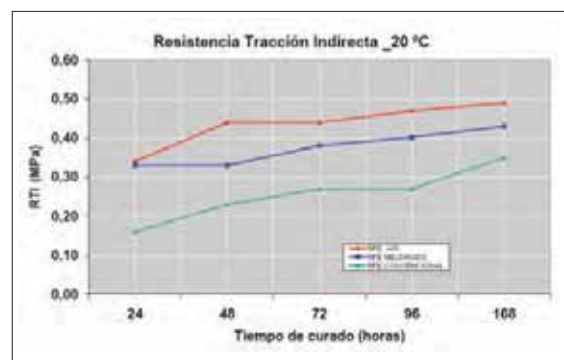


Figura 13. Comparación de RTI a 20 °C.

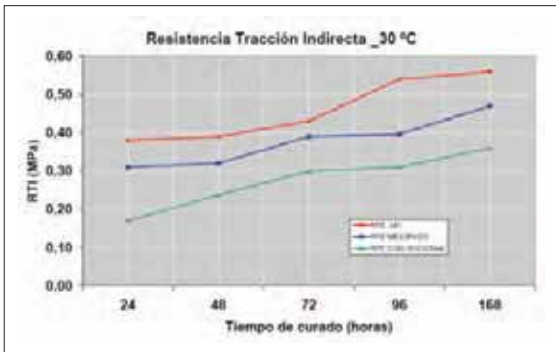


Figura 14. Comparación de RTI a 30 °C.

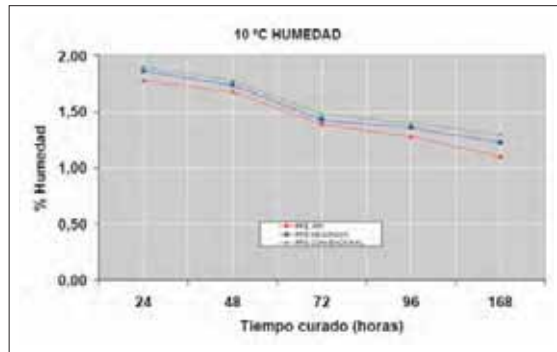


Figura 16. Comparación humedad de los RFE a 10 °C.

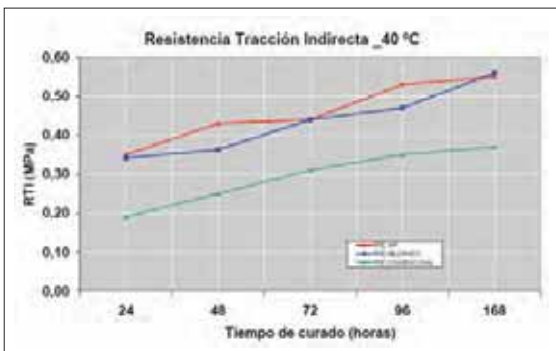


Figura 15. Comparación de RTI a 40 °C.

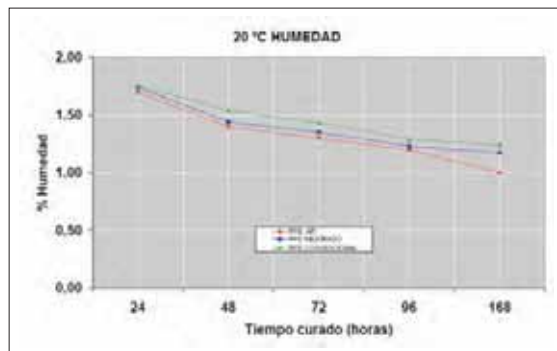


Figura 17. Comparación humedad de los RFE a 20 °C.

Las siguientes gráficas (Figuras 12 a 15) muestran una comparación de la resistencia a tracción indirecta a las distintas temperaturas de compactación establecidas de las tres mezclas estudiadas.

Las conclusiones son las mismas que en el caso del módulo: la adición de cemento y aditivos de curado permiten obtener mejores propiedades mecánicas en el reciclado en frío y parece existir un umbral mínimo de temperatura, establecido en los 20 °C, por debajo del cual las propiedades mecánicas son muy bajas.

6.4. Humedad frente a la temperatura de compactación

Las probetas rotas a tracción Indirecta se han utilizado para determinar la variación de la humedad en función del tiempo de curado, mediante secado en estufa según NLT-102. A continuación (figura 16 a 19) se presenta una comparación de humedades entre los tres sistemas de reciclado en frío.

La humedad disminuye apreciablemente a medida que aumenta la temperatura, lo que indica que el mecanismo de mejora de las propiedades mecánicas es un aumento de la

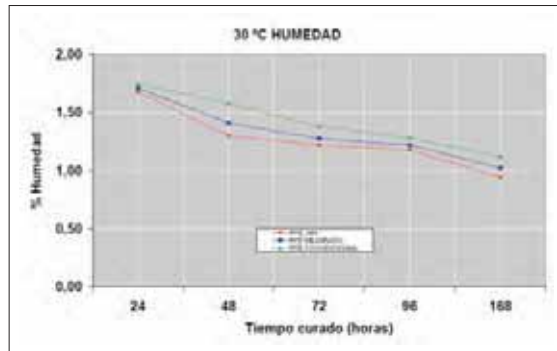


Figura 18. Comparación humedad de los RFE a 30 °C.

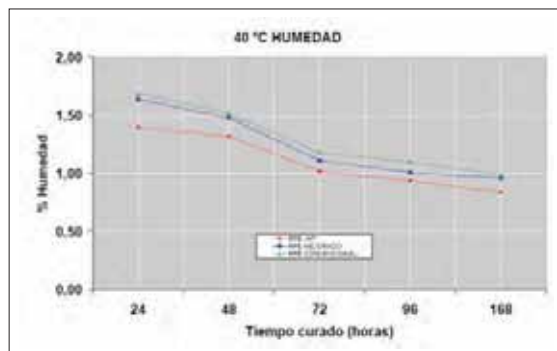


Figura 19. Comparación humedad de los RFE a 40 °C.

Influencia de la Temperatura de Mezcla en las Propiedades Mecánicas del RFE



compacidad por la eliminación de agua de compactación. Además los resultados indican que la adición de cemento es un sistema eficaz de eliminación del agua que se complementa con el aditivo acelerante.

7. Aplicación práctica

La campaña de conservación de la Autopista de Aucalsa, realizada en 2009, incluyó la rehabilitación de 14 km de calzada, basada en el reciclado en frío con emulsión de altas prestaciones (RFE API) en un espesor de 12-14 cm, hasta la grava cemento subyacente.

Se aplicaron aquí ya los conocimientos adquiridos sobre la influencia de la temperatura de la capa reciclada, por lo que se programó la ejecución en la época más favorable disponible.

Así, desde finales de mayo hasta mediados de julio de 2009, se realizó la rehabilitación de 14 km de carril lento en la Autopista de Aucalsa, fijando una temperatura mínima para la mezcla del RFE. API de 25 °C y un umbral mínimo deseable de 40 °C.

Se realizó un control termográfico (figuras 20 y 21) sobre la evolución de la temperatura del reciclado con respecto al pavimento, desde la hora inicial matinal en función del

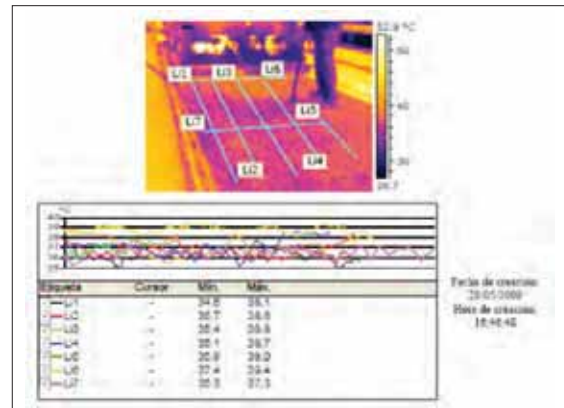


Figura 20. Termografía de la capa reciclada en horario de tarde.

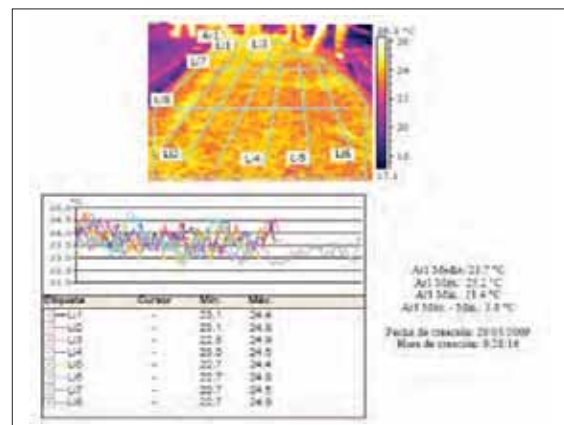


Figura 21. Termografía de la capa reciclada en hora de mañana.

tiempo de insolación. Esto ha permitido controlar un nuevo parámetro en los reciclados con emulsión.

Así, en la puesta en obra se fijaron unos umbrales mínimos de temperatura, por encima de las cuales las prestaciones buscadas en el reciclado estarían aseguradas, mientras que con temperaturas inferiores no se debería proceder a reciclar, salvo que el equipo sea capaz de elevar esa temperatura hasta el umbral mínimo aceptable.

8. Conclusiones

Los reciclados de firmes in situ con emulsión presentan una serie de inconvenientes que limitan su aplicación, ligados a la necesidad de un periodo de curado inicial antes de su puesta en servicio.

Los estudios presentados en este trabajo recogen una mejora de las propiedades mecánicas y un acortamiento de

los plazos de curado o maduración de los reciclados en frío con emulsión.

Se ha determinado que existe una influencia muy significativa de la temperatura en las propiedades mecánicas de los reciclados en frío con emulsión.

Los resultados experimentales indican que, para alcanzar propiedades mecánicas adecuadas en los reciclados en frío, es necesaria una temperatura mínima de compactación de 20 °C.

El curado e incremento adecuado de las propiedades mecánicas, densidad, módulo y cohesión, con el tiempo de los reciclados en frío se ve favorecido por la temperatura. Así, mientras mayor sea la temperatura a la que evoluciona el reciclado en frío, mayores serán sus propiedades mecánicas.

Junto a la temperatura, otro factor que influye es el uso de aditivos, que permiten eliminar el agua no evacuada en la compactación, mejorando las propiedades mecánicas de los reciclados en frío.

En definitiva, es importante establecer un nuevo parámetro en la ejecución de cada formulación de reciclados a edad temprana, cual es la temperatura de puesta en obra de la mezcla en el momento de la compactación, por encima de la cual las prestaciones buscadas en el RFE estarían aseguradas.

9. Bibliografía

[1] Belmonte, A. et al. Noviembre 2000. *Experiencias en la puesta en obra en la rehabilitación de la A92, tramo Loja – Moraleda de Zafayona*. Jornadas sobre técnicas de reciclado de materiales para capas de firme, Granada.

[2] García Santiago, J.L. et al. Noviembre- Diciembre 1995. *Artículo sobre la obra en la N630, Tramo Cañaveral-Cáceres*. Revista Carreteras nº 80.

[3] Páez Dueñas, A. et al. 2008 y 2009. *Reciclado en Frío in situ de Altas Prestaciones. Experiencias y Resultados*. IV Jornadas de Asefma, Madrid y VIII Congreso Nacional de Firmes, Valladolid.

[4] Páez Dueñas, A. et al. 2009. Nuevas Tecnologías en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos. XV CILA.

[5] *Proyecto de I+D: desarrollo de una nueva formulación de Reciclados en Frío con Emulsión de firmes bituminosos con altas prestaciones iniciales para la rehabilitación de firmes en autopistas y carreteras de alta capacidad*. Programa CDTI 2006.

[6] Proyecto Fenix: Tarea 8 Reciclados en Frío. CDTI. Programa Ingenio 2010. <http://www.proyctofenix.es>.

[7]- *Reciclado en Frío con Emulsión en la Autovía A92, en Granada. Seguimiento y evolución de las mezclas*.

[8]- Sánchez Caba, J. et al. 1998. *Reciclado con rejuvenecedores de los pavimentos de las carreteras*. Aplicación al tramo Guadix-Granada de la A92. I Congreso Andaluz de Carreteras, Granada.