



 Asociación
Española de la
Carretera

**EDICIÓN ESPECIAL
XVI CONGRESO
MUNDIAL DE LA IRF**

Mayo 2010

**SPECIAL EDITION
16th IRF WORLD
MEETING**

May 2010

Selección de artículos 2008

- **Proyecto SCORE Balance final**
Juan José Potti
- **Nanoemulsiones de betún y su interés para el reciclado en frío de mezclas bituminosas**
Didier Lesueur • Laetitia Herrero • Nuria Uguet • Javier Hurtado • José Luis Peña • Juan José Potti • Jean Walter • Ian Lancaster
- **Estabilización de suelos con cal: actuaciones previas a su ejecución**
Rafael Fernández Aller
- **Los impactos sobre el territorio, ocupación y fragmentación**
Justo Borrajo Sebastián
- **Estudio comparativo de la fatiga de betunes y mezclas bituminosas**
Óscar Reyes Ortiz • Félix Pérez Jiménez • Rodrigo Miró Recasens • Alfredo Hernández Noguera
- **Túneles con tuneladoras. Las mayores tuneladoras del mundo (I)**
Álvaro Fernández Cota • Enrique Fernández
- **Túneles con tuneladoras. Las mayores tuneladoras del mundo (II)**
Santiago Serrano Pérez

Proyecto SCORE

Balance final



Juan José POTTI

Gerente de ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas)
y Coordinador del proyecto SCORE
(Director Técnico de Probisa durante el proyecto)

Este artículo ha sido publicado por la revista francesa REVUE GÉNÉRALE DES ROUTES ET DES AÉRODROMES en su número 855, de febrero de 2007, páginas 77 a 85 inclusive, y se edita ahora en CARRETERAS gracias al Convenio de Colaboración suscrito entre ambas publicaciones.

RESUMEN

A pesar de las importantes medidas propuestas por la Comisión Europea, elevará el gasto en programas de I+D hasta alcanzar el 3% del producto interior bruto en el año 2010, para fomentar el desarrollo de la I+D en Europa, la situación actual no es buena cuando se compara con la de Estados Unidos o Japón. El Programa Marco de la Comisión hoy supone el 3,7% del presupuesto total de la Comisión Europea. Aunque el documento que maneja la Comisión no especifica aún cifras concretas, los expertos apuestan por un gasto 9.000 millones de euros anuales para el VII Programa Marco.

La I+D es la pieza clave del crecimiento económico y de mejora de la competitividad europea. Duplicar el gasto anual en I+D respecto al 6º Programa Marco, como propone el Comisario de Investigación Janez Potocnik, incrementaría las exportaciones hasta el 0,64% en 2030 y reduciría las importaciones en un 0,3%.

La foto de familia europea en términos de inversión en I+D no es especialmente afortunada. Cuando el objetivo se centra en el sector de la construcción y más concretamente en el de la construcción y conservación de carreteras la situación es sustancialmente peor.

Son escasas las referencias existentes en la actualidad de empresas europeas del sector de carreteras que dispongan de recursos y tradición en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Para corregir esta situación, en mayor o menor medida todos los países europeos tratan de estimular estas iniciativas con soluciones diversas.

En este artículo se hará balance final de un proyecto que ha sido desarrollado durante el 5º Programa Marco y financiado por la Comisión Europea. El proyecto SCORE.

El objetivo final del proyecto SCORE (www.score-project.org) ha sido profundizar en el conocimiento de las mezclas bituminosas recicladas en frío, y conseguir optimizar la técnica. De este modo se posibilitaría una opción atractiva para los gestores de la conservación de las redes de carreteras europeas. El proceso de optimización cubre las técnicas convencionales de reciclado con emulsión, así como el desarrollo de procesos innovadores mediante el empleo de la espuma de betún y de emulsiones micronizadas (o nanoemulsiones).

El proyecto plantea un enfoque sistemático que cubre todas las etapas desde la caracterización de los materiales componentes hasta la puesta en obra de la mezcla final y la valoración coste/beneficio desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental.

Palabras clave: Reciclado, Emulsión, Nanoemulsión, Reciclado en frío, Espuma de betún, Ligante bituminoso, SCORE.

ANTECEDENTES

A lo largo de los siete artículos anteriores aparecidos en esta publicación se han abordado aspectos concretos del Proyecto SCORE^(I a VIII). Las organizaciones integrantes del proyecto, reparto de tareas y otros aspectos ya han sido descritos. En este artículo se realizará un balance global.

El Proyecto SCORE estuvo enmarcado dentro del 5º Programa Marco de Investigación y Desarrollo de la Comisión Europea (Contrato nº G1RD-CT-2002-00742), técnicas de construcción medioambientalmente favorables ("EFCT-Environmentally Friendly Construction Technologies"). El título completo del proyecto de investigación fue: *Reciclado en Frío Optimizado basado en las ventajas de las microemulsiones bituminosas y la espuma de betún. Un sistema EFCT para la conservación y rehabilitación de carreteras.*

El objetivo global del Proyecto era avanzar en los campos del diseño, caracterización del material, ejecución y comportamiento del reciclado en frío de mezclas bituminosas como técnica de conservación y rehabilitación de carreteras.

La técnica de reciclado *in situ* tiene como objetivo el aprovechamiento de los materiales deteriorados de la carretera sin trasladarlos a una central de fabricación, mediante el fresado o disgregación del material a tratar, s seguido de la mezcla íntima de este material con un ligante bituminoso, agua, y árido de aportación y compactación del material resultante. Todas estas operaciones se realizan sobre el terreno.

En el año 2003, poco después de iniciado el proyecto SCORE, la Asociación Mundial de la Carretera AIPCR a través del Comité Técnico 7/8 Firms varios bajo la dirección de Jean-François Corté presentó un documento sobre el *Reciclado in situ en frío con emulsión o con espuma de betún* («*Retraitement en place à froid à l'émulsion ou à la mousse de bitume*»)^(IX).

Este documento se desarrolló gracias al trabajo de una comisión de 8 miembros y colaboradores de varios



Foto 1. Una de las actuaciones de difusión de resultados y valoración del proyecto SCORE, tal y como se recogió en la prensa local de Andalucía.

países (Estonia, Canadá, Noruega, Estados Unidos y Japón). Yo tuve el privilegio de participar dentro del grupo de trabajo de redacción junto a otros siete colegas de varios países.

Una de las conclusiones de ese informe fue la constatación del escaso grado de desarrollo de esta técnica a nivel mundial y la necesidad de potenciar las estrategias que minimicen los residuos que generan las actividades de construcción y conservación de carreteras.

El documento *Reciclado in situ en frío con emulsión o con espuma de betún* planteaba una serie de limitaciones

muy concretas de la técnica, se podrían resumir en siete apartados:

- 1. Calidad de los materiales a reciclar,
- 2. Calidad del firme,
- 3. Presencia de materiales que impidan fresar,
- 4. Presencia de dificultades que impidan fresar,
- 5. Limitaciones climáticas,
- 6. Limitaciones por comportamiento mecánico, y
- 7. Limitaciones derivadas de la protección.

El proyecto SCORE ha tratado de dar respuesta a todas y cada una de estas limitaciones. En los siete artículos precedentes se ha tratado de reflejar algunos aspectos concretos desarrollados dentro del proyecto^(I a VIII).

PARTICIPACIÓN Y DIFUSIÓN DEL CONOCIMIENTO GENERADO

Proyectos como SCORE, más de 300 hombres-mes de dedicación, permiten concentrar grandes esfuerzos. La rentabilidad de estos proyectos con tantos socios depende de la competencia, complementariedad, confianza y grado de implicación en el desarrollo de esa técnica de los socios.

La figura del Comité de Orientación, miembros expertos internacionales ajenos a los socios participantes, han permitido unir la I+D con las estrategias del sector y difusión de resultados (ver Foto 1).

Las colaboraciones reales con los socios adecuados superan siempre las mejores expectativas iniciales.

Un proyecto de I+D+i no debería depender su desarrollo de la obtención o no de subvenciones o desgravaciones fiscales. Cualquier proyecto que para su desarrollo parte de esta premisa es un pobre proyecto. El desarrollo en I+D+i debe partir de la convicción que desde la inversión en recursos de investigación y desarrollo se mejora la

Pais	Materiales disponibles (toneladas)	Porcentaje utilizado en reciclado en caliente	Porcentaje utilizado en reciclado en frío	Porcentaje de la producción de mezclas nuevas conteniendo reciclado
Austria	550 000	10	10	
Bélgica	1 500 000	40		36
República Checa	425 000			
Dinamarca	218 000	83		48
Francia	6 500 000	13	<2	<10
Alemania	14 000 000	82	18	60
Hungría		15	0	0,6
Irlanda	36 000	36	0	1,5
Italia	14 000 000	18		7
Holanda	3 000 000	75		63
Noruega	406 000	23	20	10
Polonia	1 080 000	4	55	0,1
Eslovaquia	123 000			
Eslovenia	22 000	50		15
España	2 250 000	8	4	3,5
Suecia	750 000	40	60	35
Suiza	600 000	50	50	
Reino Unido	4 500 000			
Japón				
				71,4
Ontario - Canadá	3 000 000	60	0	
Venezuela		0		0

Tabla 1. El reciclado de materiales de carreteras en Europa y en el Mundo (fuente EAPA, Asphalt in Figures 2005).

competitividad, se favorece el crecimiento económico y el bienestar social.

Todos y cada uno de los socios industriales que han participado en SCORE han valorado las posibilidades de mejora en términos técnicos y económicos. En este punto, es evidente que gracias a la subvención obtenida por la Comisión Europea, el 50% de los gastos, el balance económico se hace más favorable.

SCORE ha sido un proyecto que va a permitir un mayor y más rápido grado de desarrollo europeo de la técnica del reciclado de pavimentos bituminosos con ligantes bituminosos. Gracias a un proyecto de investigación con organizaciones de varios países europeos las experiencias se difundirán más rápidamente. La ejecución de los tramos de ensayo en tres países europeos: España, Francia y Chequia^(V,VI), permitirá promocionar la técnica en Europa.

El objetivo final del proyecto SCORE (www.score-project.org) era profundizar en el conocimiento de los materiales asfálticos reciclados en frío, y conseguir optimizar la técnica de modo que constituya una opción atractiva para los gestores de la conservación de redes de carreteras europeas.

Lamentablemente la situación actual en Europa dista mucho de ese objetivo. Según la estadística elaborada por la *European Asphalt Pavement Association (EAPA)* sobre los datos del año 2005 (ver Tabla 1), las toneladas disponibles de ser recicladas en los diferentes países europeos superan los 40 millones de toneladas. En diez de los 18 países, que han ofrecido datos a esta estadística, el empleo del reciclado en frío es inexistente. En la actualidad sólo se recicla en frío en Austria, Francia, Alemania, Noruega, Polonia, España, Suecia y Suiza, según esta información.

Las principales ventajas que presenta la técnica del reciclado en frío desde el punto de vista ambiental son:

- Economía de transporte, dado que el aporte de nuevos materiales es limitado,
- Economía de energía, al tratarse de una técnica en frío, que no necesita del calentamiento de materiales componentes,
- Economía de recursos naturales, mediante el aprovechamiento de los materiales existentes en la carretera. Especialmente relevante es la reducción en la utilización de áridos minerales, cuya producción en canteras y/o graveras implica impactos importantes. También se reduce la cantidad de betún asfáltico necesaria respecto a la ejecución de una mezcla bituminosa no reciclada,
- Reducción de vertidos, y
- Reducción de riesgos de ejecución, y de emisiones contaminantes inherente a las técnicas en frío.

Todos estos argumentos, sin duda atractivos, chocan con la realidad actual. El grado de empleo del reciclado en frío como técnica de rehabilitación en Europa es muy escaso.

Las limitaciones a la técnica expresadas en el trabajo de la AIPCR^(X) y los argumentos expresados por el Comité de Orientación del proyecto SCORE han sido tenidos muy en cuenta para establecer la orientación adecuada



Foto 2. Ejemplo de material procedente de un fresado en España obtenido en uno de los ensayos del proyecto SCORE

a los programas de trabajo de las tareas que componen el proyecto.

ALGUNAS RESPUESTA DE SCORE A LAS LIMITACIONES DE LA TÉCNICA

El proyecto SCORE ha tratado de dar respuesta a todas y cada una de las limitaciones de la técnica que se han descrito en el documento de la AIPCR.

1. Calidad del firme y de los materiales a reciclar

Para poder definir adecuadamente los requisitos de calidad de los materiales a reciclar y de calidad del firme es preciso profundizar en la influencia que tiene el tamaño de las partículas de material fresado obtenido durante el proceso de reciclado. En la tarea primera del proyecto, *Efecto sobre los tamaños de partículas*, se han cuantificado los parámetros fundamentales (velocidad de avance, profundidad, velocidad de giro, número de picas, etc..) Este trabajo ha sido abordado en las publicaciones primera y cuarto de esta serie de artículos (Foto 2)^(V).

Uno de los objetivos del proceso de disgregación del firme debe ser reducir al mínimo las partículas superiores a 25 mm. En el análisis previo del estado de las capas del firme es fundamental conocer el nivel de adherencia entre las capas del firme para poder predecir el nivel de disgregación que se puede alcanzar. Esta es una conclusión muy interesante obtenida por el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)* en la tarea 1^(V).

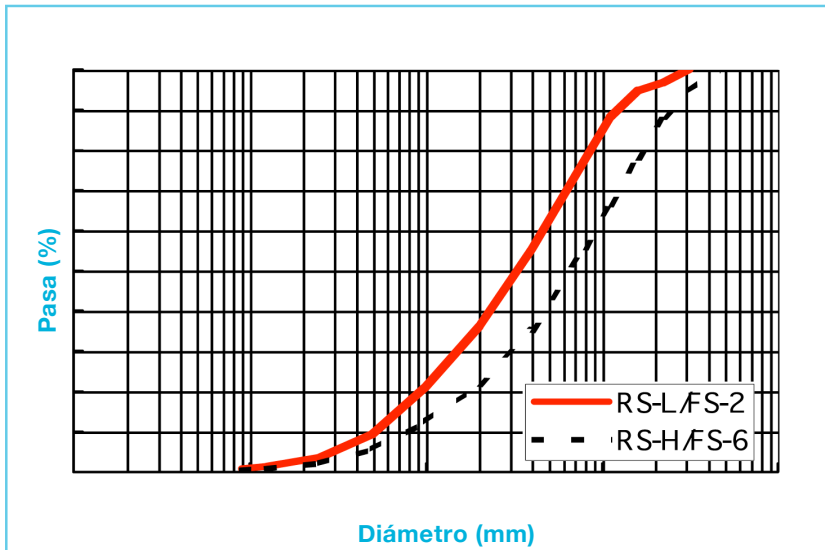


Figura 1. Efecto de la velocidad de avance del equipo de fresado ($FES = 2$ a 6 m/min) y de la velocidad de rotación del tambor ($RS = 130$ a 200 rpm) en la granulometría del pavimento bituminoso fresado que proviene de un espesor de 10 centímetros en Ždár (República Checa).

En situaciones donde se aprecia un despegue parcial de las capas a reciclar y especialmente si la capa superior esta muy agrietada es conveniente realizar alguna de estas medidas o las tres, según la situación planteada:

- un fresado previo de ambas capas con un tambor dotado de suficiente número de picas,
- reducir la velocidad de avance y/o aumentar la velocidad de rotación del tambor (Figura 1), y
- no reciclar menos de 8 centímetros de espesor de pavimento

Un aspecto destacado de la investigación de los diferentes materiales procedentes del fresado analizados en el proyecto Score ha sido su diferente reactividad^(x). En general, cuando se habla de reciclado se suele aludir a la importancia del grado de envejecimiento del ligante de la mezcla a reciclar. Este aspecto se abordará más adelante. En el proyecto se ha constatado la diferente reactividad que presentan los fresados. Este aspecto ha sido abordado en la cuarta comunicación.

Se ha desarrollado un método para evaluar la reactividad (ver Foto 3) y disponer así de un criterio técnico para establecer la formulación de la emulsión más adecuada^(x).

Se ha verificado que los reciclados con espuma de betún son menos sensibles a la naturaleza de los fresados y a los parámetros de formulación que los reciclados con emulsión convencional o con nanoemulsión^(iv).

Se han analizado y realizados tramos experimentales en dos países europeos que ofrecen quizás fresados con las características más extremas:

- En España, con mezclas bituminosas con un contenido de ligante del 4 al 5 % y alto grado de envejecimiento, penetración a 25°C inferior a 10 1/10 mm y temperatura de anillo y bola de 70 a 80°C (Foto 4), y
- En Chequia con fresados procedentes de mezclas bituminosas con un contenido de ligante del 5,8 al 8 % y un menor grado de envejecimiento, penetración a 25°C de 25 1/10 mm y temperatura de anillo y bola de 50 a 55°C^(vi).

Este rango de característica puede abarcar las características de los fresados que se pueden obtener en la mayor parte de los países europeos.

Tanto a nivel de laboratorio como en los tramos experimentales se ha observado que el grado de envejecimiento del fresado no ha tenido una influencia directa en las propiedades mecánicas de la mezcla^(vi, vii).

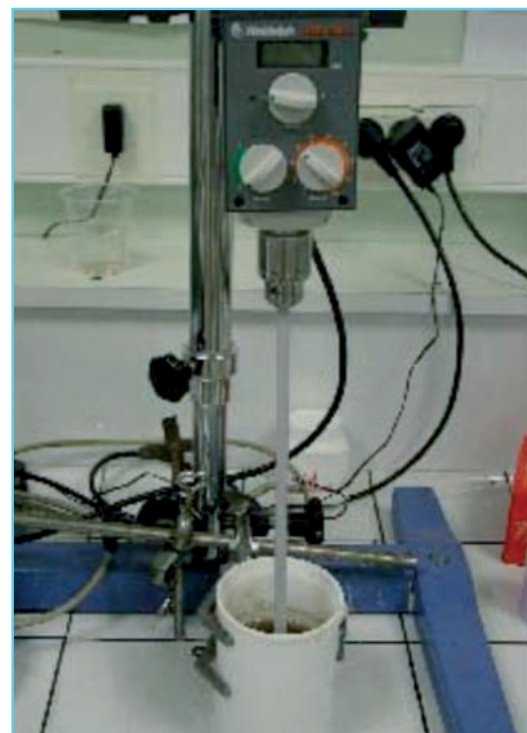


Foto 3. Equipo de ensayo para evaluar la reactividad empleado en el proyecto SCORE



Foto 4. Tramo experimental realizado con motivo del proyecto SCORE en Moguer (Huelva).

2. Regeneración del ligante envejecido

Otro asunto que ha sido abordado en SCORE ha sido el análisis científico de las posibles interacciones entre el ligante viejo y el betún nuevo⁽¹⁾. ¿Hasta que punto un ligante envejecido puede rejuvenecer por la aportación de un agente rejuvenecedor? ¿Y cuánto tiempo es necesario? Los posibles resultados de esta tarea establecerían algunas pautas sobre la elección del nuevo ligante. De este asunto se ha tratado en la primera publicación de esta serie de artículos⁽¹⁾.

El trabajo se ha realizado analizando la cinética de difusión entre el ligante viejo y el nuevo. Esta tarea se ha efectuado a través de medidas reológicas. Una capa de ligante viejo y otra del nuevo, se colocan en cada plato de un reómetro del tipo platoplate. El módulo del sistema se estudia como una función del tiempo y puede interpretarse en términos de los parámetros de difusión. En paralelo, se miden directamente cinéticas de difusión en mezclas para ver cómo los resultados a nivel teórico son aplicables a la situación real.

La variable a analizar es el aumento del módulo aparente medido por DSR de un material bicapa, como consecuencia de la difusión de una capa de 0,1 mm de espesor de betún de penetración 400

1/10 mm en una segunda capa de 0,2 mm de espesor de betún 15 1/10 mm de penetración artificialmente envejecido. La difusión se pone en evidencia muy lentamente, para tiempos superiores a las 30 horas y a 80 °C⁽¹⁾. Se han realizado dos ensayos, y el método de análisis reproduce bastante bien. Sin embargo, a esta temperatura, la difusión es muy lenta.

Estos y otros experimentos han puesto de manifiesto que a temperatura ambiente la velocidad de difusión de un betún blando en un betún envejecido es extraordinariamente lenta, tanto como para pensar que en estas condiciones el tiempo necesario para que se realice la difusión, la regeneración del ligante envejecido, ¡¡excede el periodo de servicio de la mezcla reciclada!!

Una aportación muy interesante al proyecto ha sido la posibilidad de añadir aceites regenerantes al fresado, previamente a su empleo⁽¹⁾. El periodo óptimo es un tiempo de espera de una semana, lo que impide su aplicación en el reciclado *in situ* pero lo hace perfectamente viable en el reciclado en central.

Una aportación moderada de aceite regenerante, en torno al 0,1 por ciento del fresado seco siete días antes de su empleo y el empleo de un ligante más duro en la formulación de la emulsión junto con una adición de cal o cemento en cantidades inferiores al 1% han permitido obtener mezclas con mejores propiedades mecánicas.

3. Limitaciones climáticas

Una de las limitaciones actuales del reciclado en frío es la sensibilidad al agua y escasa cohesión inmediatamente

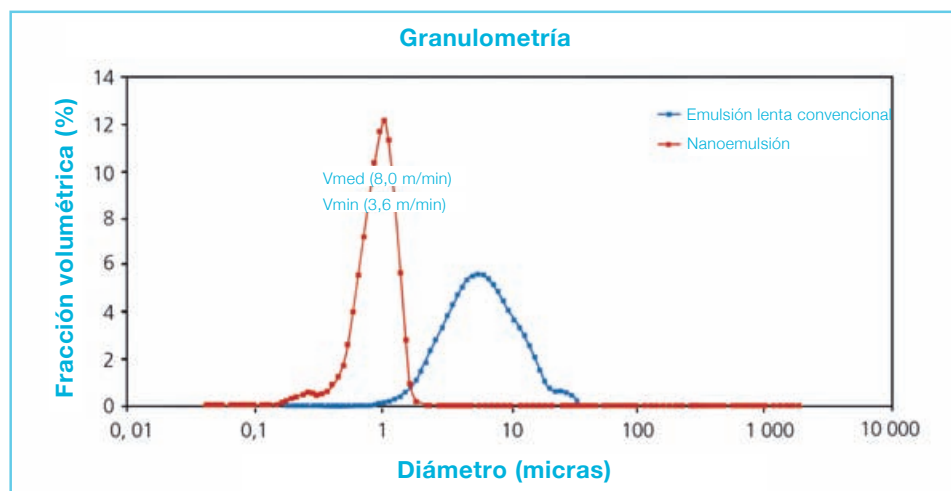


Figura 2. Comparación de las granulometrías de una emulsión convencional de tipo lento y de una nanoemulsión.

después de su puesta en obra. Esta situación se agrava bajo condiciones climatológicas adversas, alta humedad y baja temperatura.

En el proyecto Score se ha empleado por primera vez una nanoemulsión bituminosa^(III a VIII). La nanoemulsión bituminosa es una emulsión bituminosa con una distribución de tamaños de partículas más baja que una emulsión bituminosa convencional (ver Figura 2) y cuyo diámetro medio es similar o inferior a una micra. Esta reducción del tamaño de partícula trae como consecuencia una mayor superficie específica de la nanoemulsión lo que se traduce en una mayor capacidad de envuelta.

Dicho de otro modo, con el mismo contenido de ligante residual la sensibilidad al agua es inferior. Esta observación ha sido constatada a bajos y muy bajos contenidos de ligante residual^(III).

Para poder ser menos dependientes de las condiciones climáticas, el objetivo es recuperar la cohesión inicial de la mezcla. En la doctrina convencional se suponía que un ligante blando o un agente rejuvenecedor era la solución más adecuada. Los datos aportados en los párrafos anteriores ponen en cuestión su necesidad desde el punto de vista de la recuperación del envejecimiento de ligante. Además, y desde la óptica de la cohesión

Method of compaction	Initial density (g/cm ³)
1	2,01
2	1,85
3	1,87
4	2,02

Tabla 2. Densidades iniciales según modo de compactación^(VI).

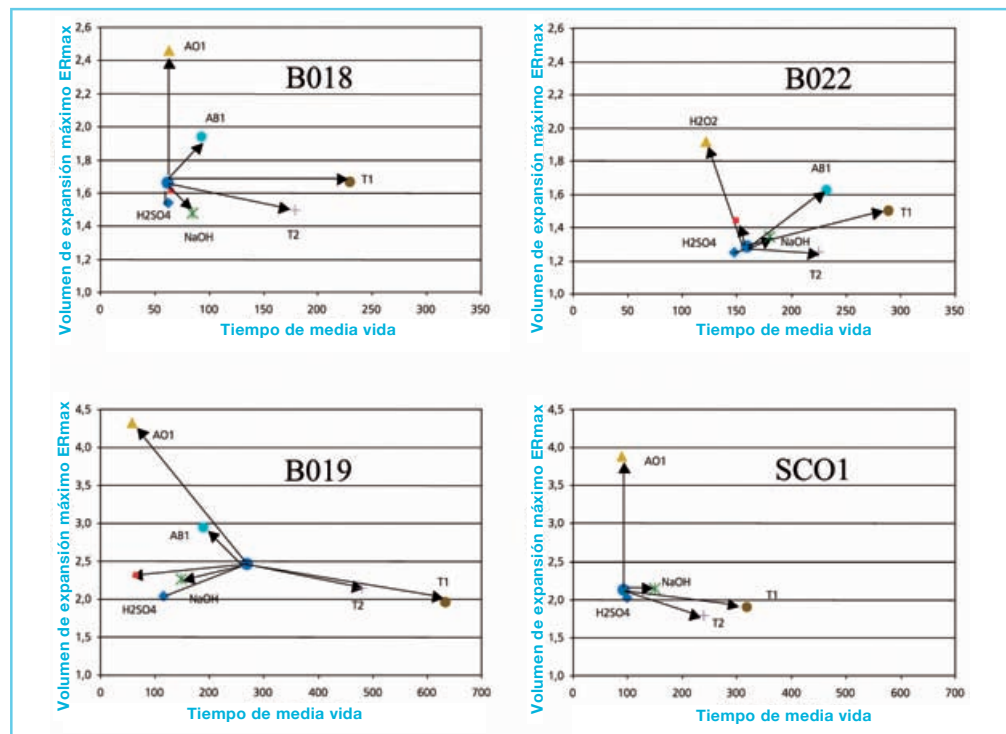


Figura 3. Efecto de distintos parámetros de formulación de espumas de betún realizadas con 4 betunes distintos, sobre su volumen de expansión máximo (ERmax) y sobre su tiempo de vida.

inicial y final un ligante duro da mejor cohesión que un ligante blando.

Por otro lado la aportación de un filler activo, 0,5-1% cemento, mejora muy notablemente tanto la cohesión inicial como la resistencia conservada y el módulo sin perder su flexibilidad. Este desarrollo ha permitido extraer testigos de obra ¡¡sólo tres semanas después de reciclado el pavimento!!

El objetivo de la adición de un 0,5-1% de cemento es similar al efecto del cemento en las lechadas bituminosas:

- Acelerar el proceso de rotura, mediante un cambio brusco de pH. Esto provoca una mejora de la cohesión inicial,
- Reducir el contenido en agua de mezcla. Esto provoca un aumento de la densidad de la mezcla y un aumento de las propiedades mecánicas,
- Aumento de la Resistencia conservada. De 10 a 15 puntos para un mismo contenido de ligante, y
- Aumento del módulo de elasticidad. Hasta un 30% para un mismo contenido de humedad.

La cohesión inicial es un aspecto crítico en la velocidad de apertura al tráfico y en la posibilidad de que el proceso

de reciclado sea menos dependiente de las condiciones climáticas.

Una limitación de la técnica era la imposibilidad de extraer testigos de obra hasta varios meses después. Gracias a los desarrollos aquí detallados esta situación ha evolucionado mucho y en el caso de la carretera A-494, San Juan del Puerto – Matalascañas (Foto 4)^(VI), se pudieron extraer testigos de la obra 4 semanas después de realizada la obra. Esto confirma un incremento de la cohesión inicial pero también la posibilidad de caracterizar mecánicamente la mezcla, la evolución de las propiedades mecánicas y la adherencia entre capas.

4. Comportamiento mecánico de la mezcla

En las tareas 6 y 7: *Diseño de mezcla y Caracterización mecánica* se han abordado aspectos fundamentales de la técnica. Es preciso diseñar y caracterizar adecuadamente la mezcla final; los ensayos actuales de diseño no son adecuados.

La carga aplicada en el ensayo de inmersión-compresión español y en el ensayo Duriez francés es mucho más alta que la carga aplicada en obra. Es tan alta que en laboratorio se podría diseñar mezclas recicladas sin ligante y ¡¡superar las especificaciones mínimas requeridas!!

En los ensayos realizados en el reciclado con espuma de betún se ha puesto en evidencia que las medidas de caracterización habituales, volumen de expansión y tiempo (Figura 3), no se han podido correlacionar con las propiedades mecánicas del material reciclado^(II, IV).

Las modificaciones de las condiciones de fabricación de la espuma no han afectado de manera significativa a las propiedades mecánicas finales.

En los tramos experimentales realizados en España, en la A-494, se han realizado cuatro sistemas de compactación diferentes, descritos en el último artículo de esta serie^(VII), que han permitido establecer ciertas diferencias en la densidad inicial (Tabla 2).

Desde el punto de vista de la regularidad del firme, el reciclado *in situ* realizado con los equipos actuales permite una mejora muy significativa. La Tabla 3 y la Figura

ANTES DE REICLAR		
Tramo	IRI Carril izquierdo	IRI Carril derecho
1	2,416	2,826
2	2,126	2,758
3	2,534	3,318
4	2,940	3,517
5	3,087	3,367
6	2,329	3,203
7	3,458	3,303
8	3,744	4,109
9	2,813	2,841
10	2,947	2,613
DESPUES DE REICLAR		
Tramo	IRI Carril izquierdo	IRI Carril derecho
1	1,264	1,264
2	1,174	1,892
3	1,665	1,544
4	2,094	2,252
5	1,823	1,962
6	1,310	1,310
7	1,444	1,500
8	1,743	2,857
9	1,981	1,873
10	1,517	1,674

Tabla 3. Resultados del IRI antes y después del reciclado *in situ* efectuado en la A494 (mismos datos que la figura 4).

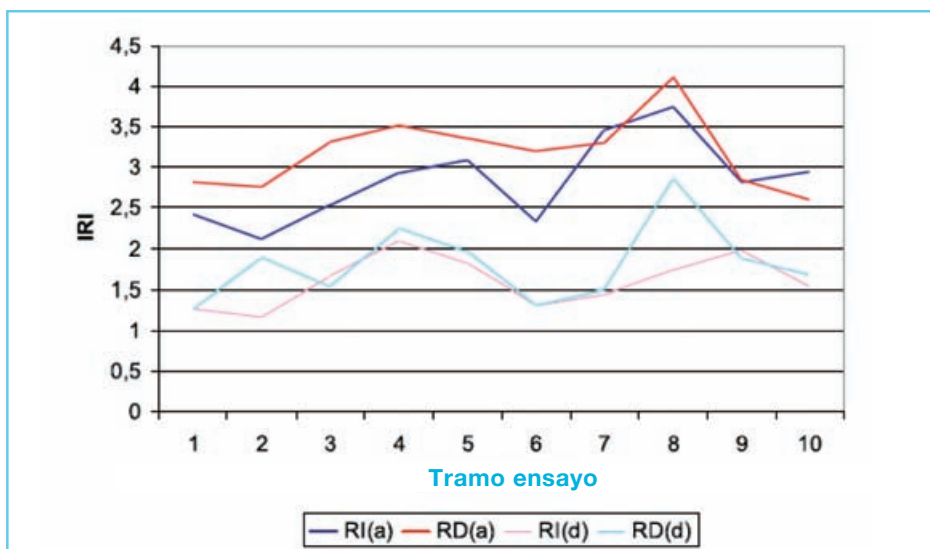


Figura 4. Resultados del IRI antes y después del reciclado *in situ* efectuado en la A494 (mismos datos que la tabla 3)

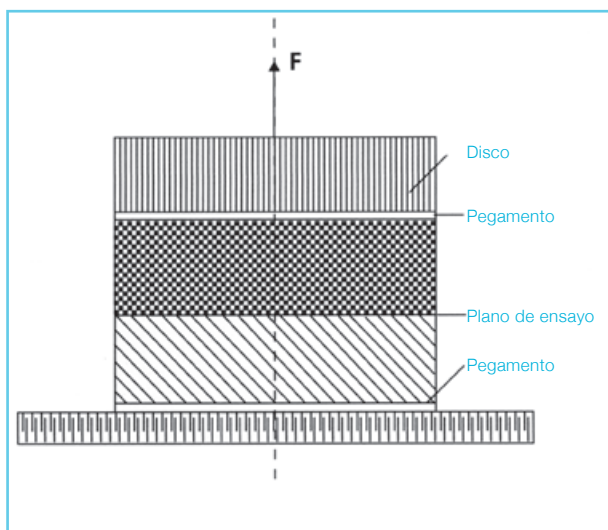


Figura 5. Esquema del ensayo alemán de evaluación del grado de adherencia existente entre dos capas.

Número de ensayo	Número de testigo	Carga max (kN)	Deformación max (mm)
1	11	8,91	3,83
4	6	19,25	0,99
4	6-1	15,65	1,51
4	7	14,85	0,91
4	8	14,69	1,88
6	6	11,67	2,21
6	7	7,10	1,12
6	8	19,74	1,66
7	12	21,65	2,28
7	13	9,74	1,99
7	14	6,11	2,03
9	11	11,62	2,35
9	12	8,43	1,90
9	13	12,44	2,41
media		12,32	1,98

Tabla 4. Carga máxima y deformación máxima registrada en el ensayo alemán (Figura 5) sobre 16 testigos extraídos de 5 de los 10 tramos en la A494.

4 muestran la reducción en el valor del IRI obtenido en los diez tramos de ensayo. Se han obtenido reducciones superiores a un punto y próximas a los dos puntos en el valor del IRI, partiendo de valores próximos a 3.

Otro aspecto clave es el grado de adherencia que se obtiene después del reciclado *in situ* realizado con equipos que efectúan simultáneamente la operación de fresado y la de extensión del material reciclado y que por tanto no realizan un riego de adherencia.

Número de ensayo	Número de testigo	Carga max (kN)	Deformación max (mm)
4	7w	15,98	1,18
4	8w	8,01	1,76
6	7w	22,5	1,79
media		15,50	1,58

Tabla 5. Carga máxima y deformación máxima registrada en el ensayo alemán (Figura 5) sobre 3 testigos de referencia.

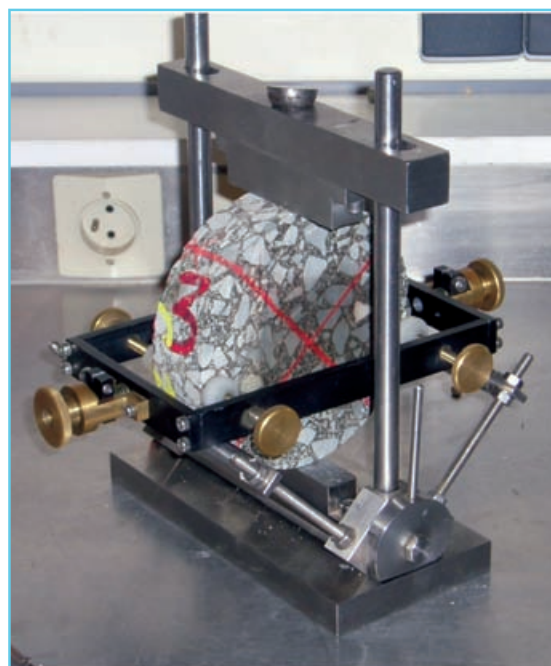


Foto 5. Probeta para el ensayo del módulo.

Siguiendo el método alemán de medida de la adherencia entre mezclas descrito en el esquema adjunto de la Figura 5, se han medido la adherencia entre capas de 16 testigos correspondientes a 5 tramos de ensayo.

En la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos de carga y deformación máxima en la unión entre la mezcla reciclada y la antigua mezcla bituminosa 2 meses después de ejecutada la obra. Estos datos han sido comparados con los de 3 testigos obtenidos de la obra pero midiendo la unión entre dos capas de mezcla bituminosa envejecida. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

Estos datos demuestran que las capas de mezcla reciclada presentan una unión a la capa inferior similar a la de las mezclas bituminosas convencionales.

Otro aspecto básico es la determinación del módulo de la mezcla. Este asunto fue tratado en la tarea 7 y se ha informado en la sexta publicación^(VI). En general se

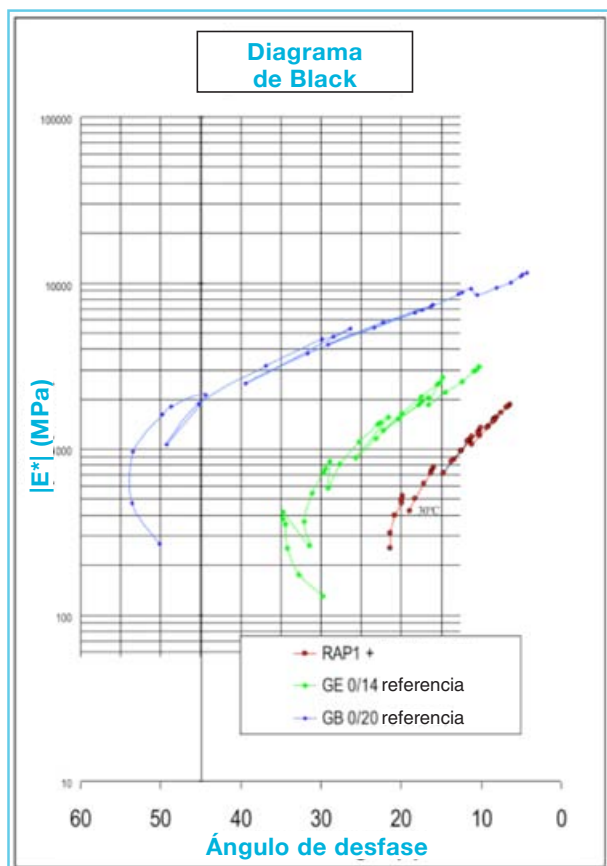


Figura 6. Resultados obtenidos en la probeta para el ensayo del módulo.

puede afirmar que el módulo de rigidez es sobretodo dependiente de la naturaleza del material fresado.

El método seguido para determinar el módulo después de 1 o 2 años ha sido el siguiente: almacenamiento de la muestra después de compactación en prensa giratoria durante 14 días a 35°C y un 20% de humedad. La fabricación de las probetas en la prensa giratoria (Foto 5) permite establecer niveles de compactación que reproduzcan una densidad y contenido en agua de la mezcla similar a la de obra.

Los valores del módulo, en estas condiciones han sido de 3000 MPa +/- 1000 MPa^(vi). Este valor puede aumentar un 15-30% según las características del material fresado y puede aumentar de un 10 a un 20% si se reduce el contenido de huecos de la mezcla un 5%.

La utilización de los distintos ligantes: emulsión bituminosa, nanoemulsión

Tramo	Módulo en tracción indirecta (MPa)	Intervalo de confianza		Contraste de hipótesis
1	2.737	1.813	3.660	0,001189
2	3.901	3.480	4.322	2,46e06
3	3.552	2.646	4.458	0,000404
4	3.582	1.694	5.470	0,006223
5	3.695	2.372	5.019	0,000303
6	3.122	1.283	4.962	0,009226
7	2.847	1.093	4.061	0,01077

Tabla 6. Módulo en tracción indirecta e intervalo de confianza obtenidos sobre los materiales reciclados en la A494^(vi).

bituminosa o espuma de betún ha tenido una importancia menor.

Por otra parte se ha comparado el comportamiento reológico de la mezcla reciclada con el de una grava-emulsión. En la Figura 6 se observa una menor susceptibilidad térmica y a la velocidad de sollicitación de la mezcla reciclada. Este hecho ha sido justificado por dos razones: el grado de envejecimiento del ligante y el empleo de una pequeña cantidad de cemento, inferior al 1%, en la mezcla reciclada.

La adición de cemento o cal, en cantidades inferiores al 1%, en las mezclas recicladas con espuma de betún parece el medio más seguro para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla y la resistencia al agua^(vi).

La posibilidad de fabricar nanoemulsiones bituminosas de ligante más duro abre la puerta a unas mejores propiedades mecánicas de la mezcla. En este proyecto, en la tercera publicación de la serie⁽ⁱⁱⁱ⁾, se ha destacado que se han obtenido módulos más elevados, un mes

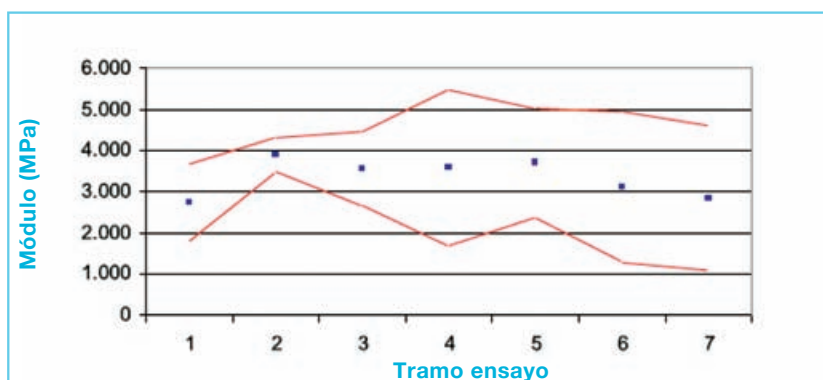


Figura 7. Resultados del módulo en tracción indirecta y del intervalo de confianza obtenidos en materiales reciclados en 7 de los 10 tramos experimentales de ensayo ejecutados en la A494 (e incluidos en la Tabla 6).

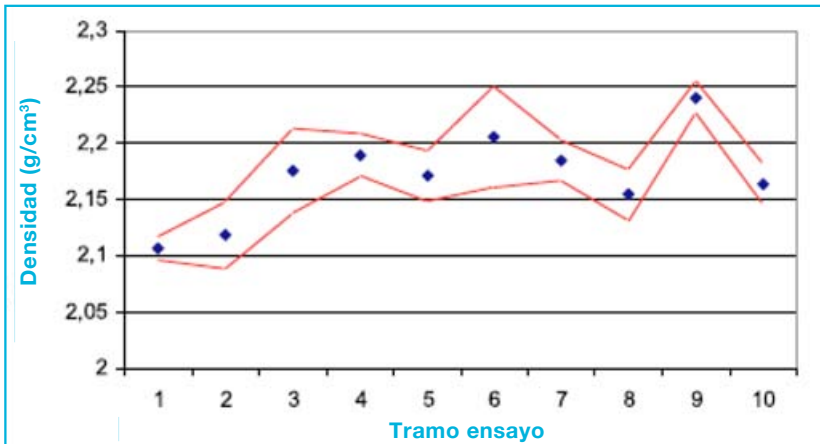


Figura 8. Resultados de la densidad y del intervalo de confianza obtenidos en materiales reciclados en los 10 tramos experimentales de ensayo ejecutados en la A494 (e incluidos en la Tabla 7).

Tramo	Densidad (g/cm³)	Intervalo de confianza		Contraste de hipótesis
1	2,107	2,096	2,118	2,20e-16
2	2,119	2,088	2,149	7,56e-14
3	2,175	2,137	2,213	3,00e-13
4	2,190	2,171	2,208	2,04e-15
5	2,171	2,149	2,193	7,92e-15
6	2,206	2,161	2,251	9,05e-13
7	2,184	2,166	2,202	2,20e-16
8	2,154	2,131	2,177	2,20e-16
9	2,240	2,226	2,255	2,20e-16
10	2,164	2,146	2,182	1,71e-15

Tabla 7. Densidad e intervalo de confianza obtenidos sobre los materiales reciclados en los 10 tramos en la A494^(vi).

después de su compactación, con el empleo de nanoemulsiones en lugar de emulsiones convencionales. Estos valores están en el rango de los módulos obtenidos en los distintos tramos de ensayo realizados en la A-494 (ver Tabla 6 y Figura 7).

Las variaciones del módulo, entre otros factores, están relacionadas con los valores de densidad alcanzados en cada uno de los tramos realizados (ver Tabla 7 y Figura 8). Estos datos han sido descritos en detalle en la séptima publicación^(vii).

Para cada tramo se ha realizado en el equipo de ensayo Cooper la ley de fatiga en tensión y en deformación se

muestran los resultados obtenidos en el tramo de ensayo 1.

Un análisis estadístico más específico para cada tramo ha permitido correlacionar los valores del módulo obtenido para cada tramo con las principales variables (Figura 11).

5. Protección de la mezcla reciclada

Una de las limitaciones habituales de las mezclas en frío es la necesidad de realizar una protección de la mezcla extendida. En muchos documentos relativos al reciclado de pavimentos en frío se establece que se debe demorar varios días desde la ejecución del reciclado antes de la aplicación del riego de curado para no dificultar la velocidad de evaporación del agua de la mezcla.

En la experiencia de Probisa en el reciclado en frío *in situ*, descrita en varios documentos recientes^(x, xi), se establece que el momento más adecuado para la aplicación del riego de curado debe ser en la misma jornada. Una dotación de unos 500-700 gramos por metro cuadrado de emulsión no es una cantidad de emulsión suficiente para evitar la evaporación del agua de la mezcla.

Los tramos de ensayo realizados en la A-494 así han sido realizados⁽⁷⁾ y los datos de densidad y evolución del módulo constatan que esta práctica es adecuada y reduce notablemente el tiempo de apertura al tráfico.

Dependiendo de las condiciones climatológicas y del tipo de tráfico la apertura al tráfico puede ser realizada en pocas horas.

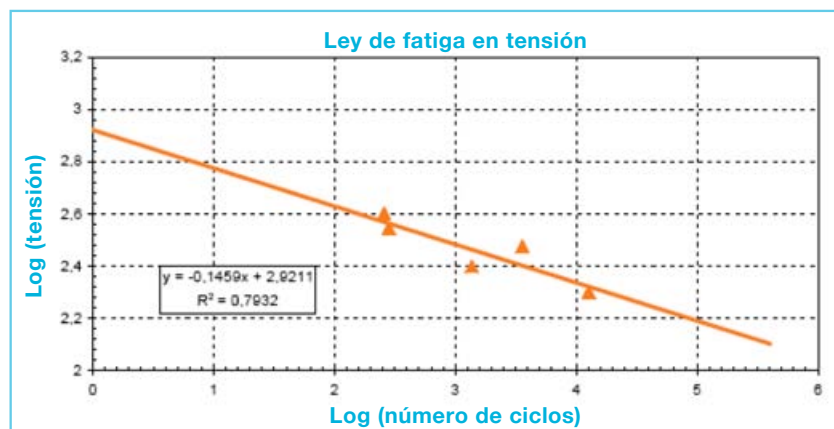


Figura 9. Ley de fatiga en tensión controlada sobre testigos obtenidos del tramo de ensayo 1 de la A494.

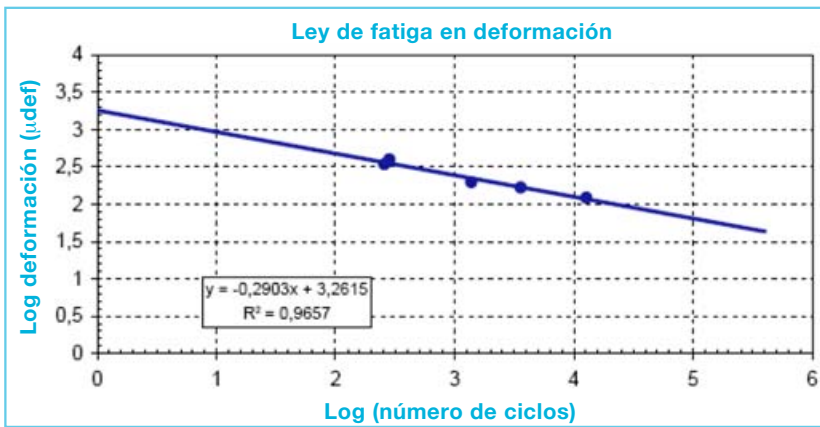


Figura 10. Ley de fatiga en deformación controlada sobre testigos obtenidos del tramo de ensayo 1 de la A494.

derivados de cada una de las tareas que han constituido el proyecto Score. En esta publicación, la última de la serie, se ha pretendido hacer un balance global y presentar, en forma muy resumida, las principales aportaciones del proyecto.

Para mí ha sido un honor nuevamente tener el privilegio de haber coordinado un proyecto europeo. Después de la experiencia del proyecto OPTEL^(XIII), el proyecto SCORE ha vuelto a demostrar que la investigación cooperativa europea es el modo más eficaz de abordar tareas de esta envergadura.

Con esta sistemática ha sido posible obtener testigos de una obra de reclado *in situ* tan sólo 3 semanas después de su ejecución.

CONCLUSIONES

Finalmente, una vez concluido el proyecto Score, gracias a la intensidad del esfuerzo y a la calidad de los trabajos realizados, como destacó el representante de la Comisión Europea en la reunión final del proyecto, el objetivo fundamental del proyecto, la promoción del reciclado en frío, dispone de muchos más argumentos científicos y técnicos para su empleo en la rehabilitación de carreteras. Esta serie de publicaciones pretende justamente eso, dar a conocer algunos de los resultados que más pueden colaborar a ese objetivo.

Como decía el Secretario General de la AIPCR, Jean-François Corté, en el texto de introducción que acompañaba a la primera publicación⁽⁴⁾, la ambición del proyecto SCORE era grande y el problema de gran complejidad dada la diversidad de factores que influyen en el resultado final, es decir en el comportamiento mecánico de la mezcla reciclada.

A lo largo de estas ocho publicaciones se han descrito de manera independiente resultados parciales

Gracias a la calidad técnica y humana de las personas directamente implicadas en el proyecto SCORE, más de 30, se ha creado de nuevo un clima de trabajo donde la colaboración científica y técnica han permitido multiplicar la calidad y profundidad de las tareas inicialmente previstas.

En la Europa actual, con 27 estados miembros, y ante la oportunidad que nos brinda el VII Programa Marco es preciso hacer un esfuerzo colectivo que

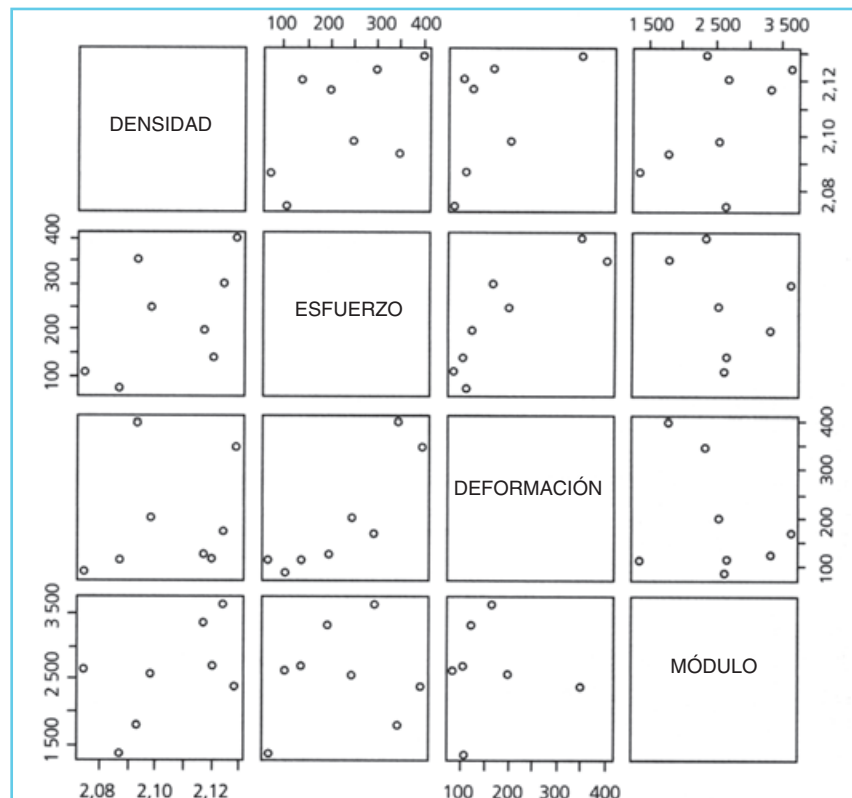


Figura 11. Correlación entre los distintos parámetros medidos sobre los tramos experimentales realizados en la A494.



Foto 6. Vista del tramo experimental realizado gracias al apoyo de la Junta de Andalucía en la A-494.

impulse la investigación cooperativa a nivel europeo en nuestro sector. En ciertas ocasiones los grandes grupos europeos de nuestro sector recelan de este modelo desde una posición de autosuficiencia. El resultado está ahí, existen muy pocos ejemplos de proyectos europeos de investigación de nuestro sector financiados por la Comisión Europea.

Sin embargo, desde el tamaño y duración de un proyecto europeo se puede aspirar a desarrollar objetivos de dimensión europea, como en otros sectores.

En España, en nuestro sector, se está estudiando la posibilidad de reconocer y favorecer a las empresas que invierten en I+D+i en los procesos de adjudicación de obras públicas. Esta sería sin duda una excelente noticia y podría marcar un punto de inflexión en el desarrollo de la I+D+i en la construcción y conservación de carreteras.

Gracias a este proyecto se han podido desarrollar varios tramos de ensayo, dos en la República Checa y uno en España, subdividido en diez subtramos, en la A-494 gracias a la Junta de Andalucía (Foto 6). Desde aquí quiero expresar mi agradecimiento y confianza en el seguimiento de estos tramos.

Del seguimiento de estos tramos se pueden obtener informaciones muy importantes de cara al establecimiento de nuevas especificaciones nacionales o europeas.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer públicamente, en nombre del consorcio SCORE, a la Comisión Europea su importante contribución financiera a través del 5º Programa Marco dentro del programa específico "Promoting Competitive and Sustainable Growth".


Quisiera agradecer, por orden según las publicaciones, a Ian Lancaster, Jean Walter, Pierre Attané, Ahmad Kalaaji, Miguel Cruz, Frederic Delfosse, Bernard Eckmann, Paul Landa, Tina Tanghe, Didier Lesueur, Laetitia Herrero, Nuria Uguet, Javier Hurtado, José Luis Peña, José Miguel Baena, Lionel Odie, Claire Naudat, Yves Brosseau, Alain Béghin, Frederic Placin, Michel Froumentin, Jean Bauer y Jiri Fiedler por su esfuerzo en la redacción de estos ocho artículos que espero contribuyan

a la promoción del reciclado en frío en Europa.

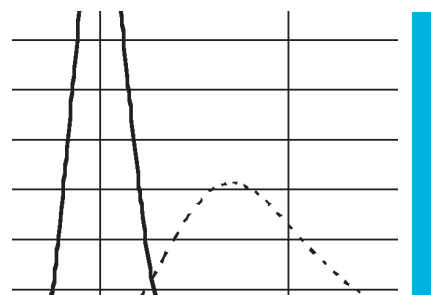
Por último gracias a todos los miembros del Comité de Orientación, del Comité de Dirección y a todos los técnicos que han colaborado en este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. I. M. Lancaster, J. Walter, P. Attané et A. Kalaaji, «Régénération du bitume dans le recyclage à froid», Revue générale des routes et aérodromes n° 848, abril-mayo 2006.
- II. M. Cruz, F. Delfosse, B. Eckmann, P. Landa et T. Tanghe, «Enrobage à la mousse de bitume», Revue générale des routes et aérodromes n° 849, junio 2006.
- III. D. Lesueur, L. Herrero, N. Uguet, J. Hurtado, J. L. Peña, J. J. Potti, J. Walter, I. M. Lancaster, «Emulsions de bitume micronisées et leur potentiel d'emploi en recyclage à froid», Revue générale des routes et aérodromes n° 850, julio-agosto 2006
- IV. B. Eckmann, F. Delfosse, J. L. Peña, J. Walter, I. M. Lancaster, J. M. Baena, L. Odie, C. Naudat, Y. Brosseau, A. Béghin et F. Placin, «Recyclage à froid des matériaux bitumineux – Etudes de formulation», Revue générale des routes et aérodromes n° 851, septiembre 2006.

- V. M. Froumentin et J. Bauer, «Influence des conditions de fraisage sur la granulométrie du matériau recyclé», Revue générale des routes et aérodromes n° 852, octobre 2006.
- VI. Y. Brosseaud, V. Gaudefroy, A. Beghin, F. Placin, F. Delfosse et J. M. Baena, «Evaluation en laboratoire des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux retraités en place par les techniques à froid», Revue générale des routes et aérodromes n° 853, novembre 2006.
- VII. D. Lesueur, J. M. Baena, J. L. Peña et J. Fiedler, «Eléments de validation in situ du programme SCORE», Revue générale des routes et aérodromes n° 854, décembre 2006
- VIII. D. Lesueur, J. J. Potti, C. Southwell, J. Walter, M. Cruz, F. Delfosse, B. Eckmann, M. Mazé, J. Fiedler, I. Racek, B. Simonsson, F. Placin, J. Serrano, A. Ruiz, A. Kalaaji et P. Attané, « Superior COLD REcycling : Le projet SCORE », Revue générale des routes et aérodromes n° 827, avril 2004
- IX. AIPCR, Recyclage des chaussées – “Guides pour le retraitement en place au moyen de ciment, retraitement en place à froid à l’émulsion ou à la mousse de bitume, recyclage à chaud en centrale des enrobés bitumineux”, rapport du Comité technique 7/8 «Chaussées Routières», Paris, AIPCR Ed., 2003
- X. L. Odie, C. Naudat, Y. Brosseaud, A. Beghin, B. Eckmann et F. Delfosse, «Evaluation de la réactivité chimique et de la montée en cohésion au jeune âge des matériaux bitumineux recyclés à froid», 4^e Congrès Mondial de l’Emulsion, Article 1.4 – 311, Lyon, 2006.
- XI. J. J. Potti, M. Martínez y J. Mancebo «Diseño y sistemática de Probisa en el desarrollo de obras de reciclado en frío con emulsión in situ», Boletín Técnico de Probisa 44, 2002.
- XII. J. J. Potti y M. Martinez Nicolau, «Evolución histórica de los reciclados in situ con emulsión», Resumen de la 1^a jornada de la Asociación Española de los Fabricantes de Mezclas Asfálticas, Madrid (España), 2005.
- XIII. J. J. Potti, D. Lesueur et B. Eckman, «Vers une méthode rationnelle de formulation des enrobés à froid : les apports du projet OPTTEL», Revue générale des routes et aérodromes n° 805, 2002. 

Nanoemulsiones de betún y su interés para el reciclado en frío de mezclas bituminosas



Didier LESUEUR

Director Técnico. Probisa (España)

Laetitia HERRERO
Nuria UGUET
Javier HURTADO

*Investigadores
Polo de Emulsiones Eurovia
(Francia)*

José Luis PEÑA

*Coordinador Técnico del Proyecto FENIX
(Responsable de Asistencia Técnica de Probisa durante el proyecto) (España)*

Juan José POTTI

*Gerente de ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas)
y Coordinador del Proyecto SCORE (Director Técnico de Probisa durante el proyecto) (España)*

Jean WALTER
Ian LANCASTER

*Investigación y Desarrollo. Nynas
(Reino Unido)*

Este artículo ha sido publicado por la revista francesa REVUE GÉNÉRALE DES ROUTES ET DES AÉRODROMES en su número 850, de julio-agosto de 2006, páginas 79 a 81 inclusive, y se edita ahora en CARRETERAS gracias al Convenio de Colaboración suscrito entre ambas publicaciones.

RESUMEN

Un reciclado en frío in-situ se formula de tal manera que se consiga una rápida cohesión justo después de la puesta en obra, permitiendo así que el firme tenga propiedades mecánicas suficientes para aguantar el tráfico al poco tiempo. En la actualidad, se puede conseguir este resultado utilizando fórmulas a medida, utilizando por ejemplo un aditivo de rotura como el cemento. Una vía de mejora podría ser el empleo de emulsiones bituminosas submicrónicas ya que permiten un total control de la morfología de la emulsión.

En este artículo, se presentan los trabajos llevados a cabo durante el proyecto SCORE sobre la fabricación de emulsiones bituminosas submicrónicas. Son emulsiones de betún con diámetro medio por debajo de la micra y se denominará en adelante "emulsiones micronizadas" de betún o "nanoemulsiones" (ligante llamado "microemulsión" en otras ocasiones, aunque esta denominación se ha abandonado finalmente al utilizarse en otros campos tecnológicos, para formulaciones diferentes).

Primero, se describe el proceso utilizado para fabricar esas nanoemulsiones. Esta tecnología permite fabricar emulsiones de betún a medida, con un tamaño de partículas totalmente controlado. Luego, se describe su interés para el reciclado en frío. Los resultados demuestran una mejora de la resistencia conservada, en línea con las expectativas iniciales. También el módulo a corto plazo aumenta, demostrando una mejora de la toma de cohesión.

Eso confirma el interés de esta tecnología novedosa, especialmente para el reciclado en frío.

Palabras clave: *Emulsión, Emulsión micronizada, Emulsión submicrónica, Nanoemulsión, Diámetro partícula, Reciclado en frío, Proyecto SCORE.*

El reciclado en frío es una técnica bastante utilizada para el reciclaje *in-situ* de firmes bituminosos. Eso consiste en fresar el pavimento existente y mezclar el fresado así obtenido con un ligante nuevo, que viene por ejemplo en forma de una emulsión de betún. El proceso se hace gracias a equipos especiales diseñados para realizar esos procesos⁽¹⁾. En este tipo de tratamiento, la mezcla a base de fresado se formula de tal manera que se consiga una rápida cohesión justo después de la puesta en obra, permitiendo así que el firme tenga propiedades mecánicas suficientes para aguantar el tráfico al poco tiempo.

En la actualidad, se puede conseguir este resultado utilizando fórmulas a medida, utilizando por ejemplo un aditivo que provoque la rotura como el cemento o la cal⁽²⁾. Una vía de mejora podría ser el empleo de emulsiones bituminosas submicrónicas ya que permiten un total control de la morfología de la emulsión⁽³⁾. Esas emulsiones de betún tienen un diámetro medio por debajo de la micra y por eso se denominarían en adelante *emulsiones micronizadas* o *nanoemulsiones* (ligante llamado *microemulsión* en otras ocasiones, aunque esta denominación se ha abandonado finalmente al utilizarse en otros campos tecnológicos, para formulaciones diferentes).

En este artículo se presentan los trabajos llevados a cabo durante el proyecto SCORE sobre la fabricación de esas nanoemulsiones de betún y su interés para el reciclado en frío. En un primer paso, se describe el proceso utilizado para fabricar dichas nanoemulsiones. Se presenta la tecnología empleada y se comparan sus principales características con las de los sistemas de emulsificación convencionales.

Luego, se presenta el interés de dichas nanoemulsiones para el reciclado en frío, comparado con las emulsiones convencionales.

FABRICAR NANOEMULSIONES DE BETÚN

Actualmente, las emulsiones de betún se fabrican esencialmente utilizando molinos coloidales. El betún caliente, típicamente a unos 140°C, y la fase acuosa llevando el emulsionante se mezclan durante un tiempo muy corto pasando por un sistema rotor-estator de pequeña apertura (menos de 1 mm) y una alta cizalla (en torno a 3.000 rotaciones por minuto, rpm). Con una buena elección, tanto en calidad como en cantidad, de los ingredientes, sale del molino una emulsión

acuosa de betún, caracterizada por una amplia curva granulométrica.

Aunque parámetros mecánicos como la velocidad de rotación, la apertura (no siempre controlable) o el caudal, y parámetros de formulación como el tipo y el contenido en emulsionante, afectan la finura de la emulsión, resulta bastante complicado conseguir una distribución de tamaños de las partículas o gotas distinta de la que se consigue con los parámetros habituales empleados. En consecuencia, las emulsiones de betún catiónicas suelen tener típicamente un diámetro mediano de 3 a 6 micras.

Ahora bien, los conocimientos teóricos y prácticos en el área de la emulsificación de productos viscosos han mejorado bastante y resulta posible en la actualidad utilizar otros métodos distintos al tradicional molino coloidal. Tecnologías de emulsificación con altos contenidos en fase dispersa (*“High Internal Phase Ratio”, HIPR*) se pueden aplicar al betún y permiten un control preciso de la morfología de la emulsión. Con este método, se pueden fabricar emulsiones submicrónicas de betún.

El proceso patentado HIPR se basa en los elementos siguientes:

- La emulsión se fabrica en régimen concentrado, es decir con un contenido en fase dispersa entre el 75 y el 95 % (en peso), y
- La fase dispersa es viscosa, con una viscosidad superior a 1 Pa.s.

Bajo esas dos condiciones, y al tener también una fórmula de fase acuosa adecuada, es posible conseguir emulsiones finas con una escasa polidispersidad.

Conseguir el primer punto citado es muy fácil al ser un tema de composición de la emulsión. El segundo punto tampoco resulta complicado de conseguir ya que este valor es la viscosidad del betún a temperaturas inferiores a 90°C.

Este proceso tiene la ventaja de disminuir las temperaturas de fabricación y permite también evitar la ebullición del agua. La emulsión concentrada que se forma es un producto viscoso de difícil manejo. Para evitar este problema se diluye la emulsión típicamente al 60 % de betún, para que tenga una viscosidad parecida a la de las emulsiones convencionales.

En nuestro caso, todas las emulsiones fabricadas por HIPR se hicieron con el proceso siguiente:

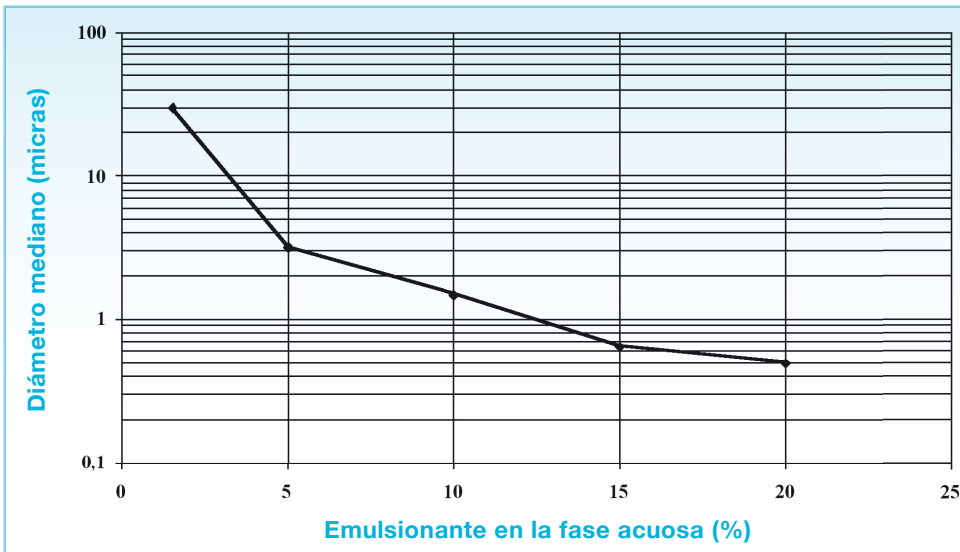


Figura 1: Evolución del diámetro mediano de la emulsión según el contenido en emulsionante en la fase acuosa, con un emulsionante catiónico comercial.

- El betún se introduce primero en el reactor hasta conseguir una temperatura homogénea de 90°C,
- En paralelo, la fase acuosa se prepara con el tensoactivo a la concentración elegida, fijando el pH a 2,5 empleando ácido clorhídrico,
- Una vez el betún alcanza la temperatura, se introduce la fase acuosa con baja agitación,
- Se aumenta la agitación hasta 680 rpm y se mantiene a este nivel hasta conseguir el tamaño deseado, y
- La emulsión se diluye al 60 % añadiendo agua con un pH ácido.

COMPARACIÓN CON LAS TÉCNICAS CONVENCIONALES

Para ilustrar el interés de la tecnología HIPR para conseguir emulsiones calibradas, se prepararon varias emulsiones con un betún 70/100 y un emulsionante comercial de uso común. El contenido en fase acuosa se mantiene en todos los casos en un 9 % en la emulsión concentrada y el contenido de tensoactivo se sube hasta un 20 %.

Como se describe en la Figura 1, el contenido en emulsionante en la fase acuosa controla el tamaño de las gotas de betún. Este proceso permite así obtener un diámetro mediano de 0,5 micras con 20 % en fase acuosa de la emulsión concentrada. Una vez diluida la emulsión al 60 % de betún, la concentración en

emulsionante es del 1,2 % sobre emulsión (s/e).

Con el fin de ilustrar las diferencias entre una emulsión convencional y una emulsión submicrónica, la Figura 2 compara la curva granulométrica obtenida con la tecnología HIPR y aquella obtenida en un molino coloidal con los mismos ingredientes (betún y tensoactivo). Así, las emulsiones por HIPR tienen una distribución muy estrecha de tamaños de partículas, con un diámetro totalmente controlado. Eso demuestra claramente el

interés de la tecnología HIPR para fabricar emulsiones de betún a medida.

INTERÉS POTENCIAL PARA EL RECICLADO EN FRÍO: CALIDAD DE ENVUELTA

Para ilustrar el interés de las nanoemulsiones para el reciclado en frío, se hicieron mezclas a base de un fresado procedente de una obra española, con el 4,6 % de betún residual, y el 2 o el 3 % de emulsión (sobre fresado seco s/a). Las emulsiones se obtuvieron o bien con un molino coloidal de laboratorio (emulsión convencional), o bien con la tecnología HIPR (nanoemulsión). Se emplearon el mismo betún Nynas 70/100 y el mismo tensoactivo en ambos casos. De forma sistemática, se añadió también un 0,5 % s/a de cemento.

Con fin de evaluar la calidad de envuelta, se hicieron ensayos de inmersión compresión siguiendo el ensayo vigente (NLT-162), pero con un método de compactación modificado para conseguir densidades más realistas, es decir un contenido de huecos del 15 %, tal como se observa habitualmente en las obras. Por eso, la presión de compactación se fijó en 5 MPa en vez de los 20,6 que pide la norma. En consecuencia, los valores de resistencia a compresión salen más o menos a la mitad de lo que se suele obtener con la compactación normal. En otro artículo de este especial se detallan diversos elementos más precisos sobre el método utilizado para formular las mezclas. Los resultados obtenidos para las mezclas con el 2 y el 3 % de emulsión convencional se describen en la Figura 3.

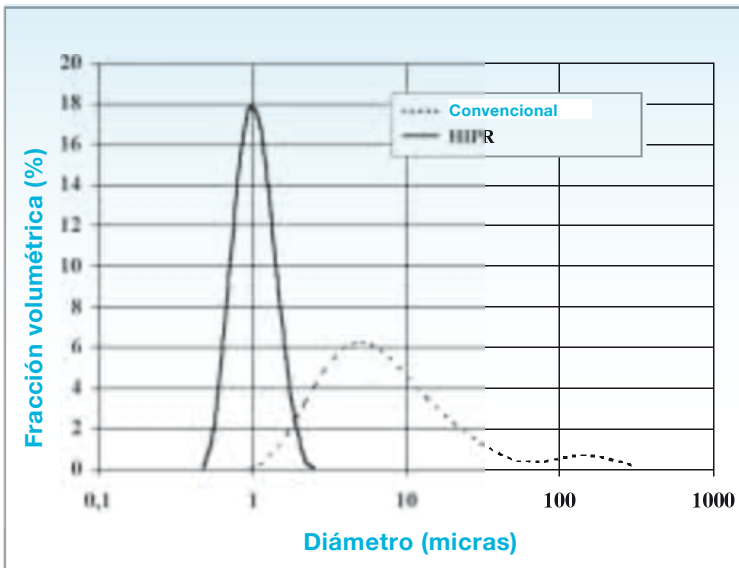


Figura 2: Comparación entre la granulometría de una emulsión convencional (fabricada con molino coloidal) y una nanoemulsión fabricada por HIPR con los mismos ingredientes.

Se destaca que con el 2 % s/a de emulsión, la fórmula con nanoemulsión no solo consigue mejores resistencias en seco R y sumergidas r, sino una mejora de la resistencia conservada r/R. Siendo idénticos tanto el tipo y penetración del betún (Nynas 70/100) como los tensoactivos empleados, esta diferencia proviene probablemente de la mayor superficie específica que aporta la nanoemulsión, mejorando en consecuencia la calidad de envuelta.

En paralelo, al 3 % s/a de emulsión, la fórmula con nanoemulsión tiene resistencias en seco R y sumergida r inferiores a la referencia convencional, manteniendo el mismo nivel de resistencia conservada r/R. Eso parece una consecuencia de un exceso de ligante en la nanoemulsión, el óptimo de contenido de ligante parece encontrarse con una diferencia del 1 % s/a sobre el de la emulsión convencional.

En resumen, la nanoemulsión permitiría así conseguir resultados comparables a los de una emulsión convencional con solo el 2 % de emulsión, cuando con una emulsión convencional se necesita el 3 %. Además, los valores

de resistencia conservada r/R se mantienen a un nivel muy elevado desde el 2 %, demostrando una buena calidad de envuelta con la microemulsión.

INTERÉS POTENCIAL PARA EL RECICLADO EN FRÍO: TOMA DE COHESIÓN

En una segunda etapa, se hicieron mezclas utilizando otro fresado esta vez procedente de una obra en Inglaterra, con el 5,5 % de betún residual, y con el 2,5 % s/a de emulsión (1,5 % s/a de betún residual) y sin cemento. Del mismo modo que anteriormente, las emulsiones se obtuvieron o bien con un molino coloidal de laboratorio (emulsión convencional), o bien con la tecnología HIPR (nanoemulsión). Se emplearon en ambos casos los mismos betunes, Nynas 70/100 o 160/220.

Las probetas se compactaron con una prensa giratoria al 15 % de huecos. El módulo de rigidez de las probetas se ha procesado en el tiempo con una prensa NAT ("Nottingham Asphalt Tester"). Los resultados obtenidos se describen en la Figura 4.

Se observa que las fórmulas a base de emulsión convencional tienen inicialmente una rigidez superior a las de las fórmulas con nanoemulsión, y eso hasta aproximadamente los 20 días iniciales del curado. Posteriormente a dicho tiempo, los reciclados con

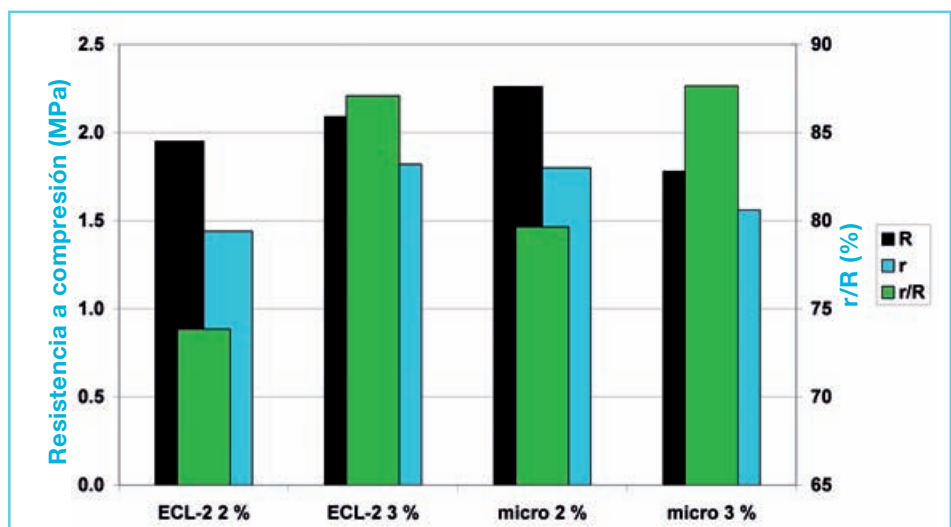


Figura 3: Resistencia a compresión en seco (R), sumergida (r) y resistencia conservada r/R para los reciclados con emulsión convencional y con nanoemulsión, compactados al 15 % de huecos (presión estática de 5 MPa).

nanoemulsión tienen un módulo algo superior, un 20 % mayor al de la referencia convencional.

Los reciclados con nanoemulsión consiguen así un módulo final mas elevado, permitiendo obtener valores superiores a 2.000 MPa a 20°C después de 1 mes de maduración.

CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado un nuevo sistema (tecnología HIPPR) de fabricación de las emulsiones de betún, que permite conseguir emulsiones a medida, calibradas y submicrónicas.

Se ha presentado y descrito el interés que tienen esas nanoemulsiones para el reciclado en frío. Potencialmente, se esperaba una mejor calidad de envuelta, lo que ha sido confirmado por los ensayos de inmersión-compresión.

Además, se ha observado un módulo mas elevado a medio plazo (un mes y mas) en comparación con la referencia convencional.

En conclusión, esta tecnología novedosa parece muy prometedora y se hicieron ensayos mas detallados, incluyendo tramos de ensayo *in-situ* durante el proyecto SCORE, como se describe en los otros artículos de este número especial de la revista.

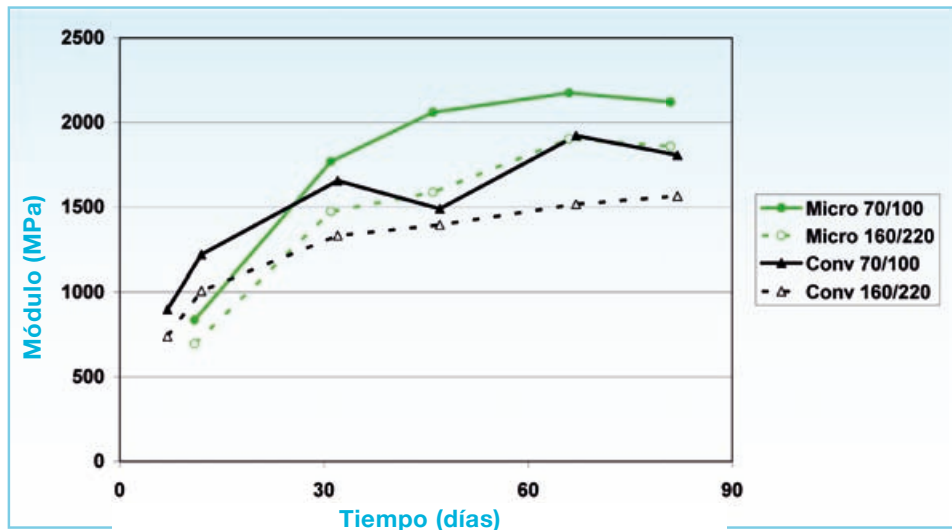

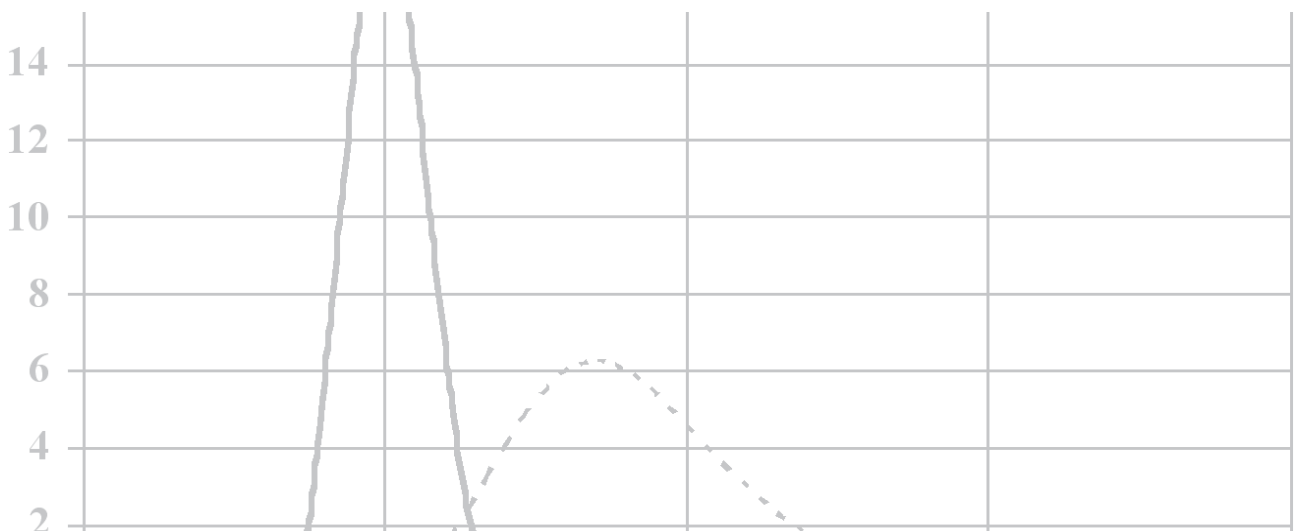


Figura 4: Módulo NAT a 20°C para varios reciclados con emulsiones convencionales o nanoemulsiones, fabricadas con betún Nynas 70/100 o 160/220.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. AIPCR, «Recyclage des chaussées – Guides pour le retraitement en place au moyen de ciment, retraitement en place à froid à l’émulsion ou à la mousse de bitume, recyclage à chaud en centrale des enrobés bitumineux», Rapport du Comité Technique 7/8 “Chaussées Routières”, Paris, AIPCR Ed., 2003.
- II. J. J. Potti, M. Martínez y J. Mancebo «Diseño y sistemática de Probisa en el desarrollo de obras de reciclado en frío con emulsión in situ», Boletín Técnico de Probisa 44, 2002.
- III. D. Lesueur, L. Herrero, J. Hurtado et al., “Taylor-made bitumen emulsions manufacturing using the High Internal Phase Ratio method”, Compte-Rendus du Congrès Mondial de l’Emulsion, Article 475, Lyon, 2006. 



Estabilización de suelos con cal: actuaciones previas a su ejecución



Rafael FERNÁNDEZ ALLER

Director General de ANCADE
(Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España)

RESUMEN

La realización de un proyecto de construcción de una carretera conlleva contemplar numerosos parámetros y condiciones, entre otras las que ocupan un lugar fundamental, los materiales de la traza y las características del suelo. Cuando aparecen suelos arcillosos, lo que es muy frecuente en muchas áreas de España, se hace necesario estabilizar dichos suelos, para cuyo cometido la cal es una alternativa muy ventajosa tanto desde el punto de vista técnico como económico, debiendo además considerar la facilidad y la celeridad con la que puede ejecutarse una estabilización con cal.

El texto analiza los cuatro elementos principales que constituyen el sistema: la cal, el suelo, la mezcla cal suelo, así como las condiciones que debe de cumplir el Estudio Previo relativo a la formulación y dosificación de la cal para obtener los mejores resultados en la obra, en los materiales y en la optimización del consumo de cal

Palabras clave: Cal, Suelo, Cal aérea, Cal viva, Cal apagada, Estabilización de suelos, Características de los suelos

Una de las aplicaciones más interesantes de la cal es su utilización para el tratamiento de suelos para carreteras y otras infraestructuras que se apoyen en suelos no estabilizados.

La estabilización de la arcilla con cal en la construcción tiene más de 5.000 años de antigüedad. Sin embargo, hablando de tiempos recientes, el tratamiento de arcillas con cal comienza en USA, en 1960, aplicando técnicas de la mecánica de suelos a las mezclas de cal y suelo, alcanzándose una práctica que aumentó su popularidad con gran rapidez, construyéndose miles de kilómetros de carreteras, sobre arcillas estabilizadas, así como numerosos aeropuertos principales como el de Dalas Fort Worth.

En Francia, la técnica de estabilización de suelos se aplicó entre los años sesenta y setenta del pasado siglo, principalmente para la reutilización en terraplén de suelos húmedos sensibles al agua.

Antes de comenzar un proyecto de construcción de una carretera (autopista) el diseño debe de acomodarse, obviamente, de una parte, a los volúmenes y características de tráfico previsto pero de otra, y en cuanto a la ejecución de la obra se refiere, de manera muy importante, debe de considerar entre otros aspectos, el medio ambiente, las características geomorfológicas y topográficas del lugar, y las condiciones de los materiales de la traza para su posible reutilización.

La estabilización de los terrenos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa muy ventajosa a los métodos tradicionales de construcción de carreteras y otras infraestructuras, tanto desde el punto de vista técnico como económico, dando celeridad a la ejecución con el interés que ello conlleva en este tipo de obras de cara al cumplimiento de plazos.

Los proyectos típicos para los que la estabilización con cal presenta un gran interés, incluyen:

- Autopistas, carreteras principales y secundarias,
- Pistas de aterrizaje y de servicio en aeropuertos,
- Aparcamientos y explanadas de fábricas,
- Estabilización de laderas,
- Caminos vecinales, pistas forestales y caminos rurales,
- Vías férreas,

- Recuperación de muelles en desuso,
- Recuperación de terrenos contaminados, y
- Rellenos estructurales.

En la estabilización de suelos con cal intervienen tres elementos fundamentales:

- Los suelos,
- La cal, y
- La mezcla cal-suelo.

Analizados los tres elementos del sistema y con objeto de establecer la adecuada formulación y dosificación de cal en la estabilización, resulta necesario proceder a realizar un Estudio Previo cuyo alcance dependerá de los conocimientos que se tengan sobre el propio suelo y las anteriores experiencias de tratamiento (ver Foto 1).

En los siguientes apartados se desarrollarán los anteriores puntos, habiendo tomado como referentes el *Manual de Estabilización de Suelos con Cal* (ANCADE 1977), la *Guía Técnica Tratamiento con Cal y Conglomerantes Hidráulicos* (LCPC 2005) y diversos estudios y experiencias realizados sobre el tema.

Los SUELOS

Se entiende por suelos a los materiales naturales constituidos por partículas o granos que pueden separarse fácilmente por simple trituración o eventualmente por la acción de una corriente de agua. Estas partículas o granos han sido generados por alteraciones mecánicas



Foto 1: Estudio previo del terreno para estabilizar con cal, en Arcos de la Frontera



Foto 2. La caracterización de un suelo (en la foto, Arcos de la Frontera) se realiza mediante parámetros de naturaleza y parámetros de estado.

o fisicoquímicas de rocas madre de todas las naturalezas. Sus características pueden ser extremadamente variables según la naturaleza de la roca madre y sobre todo según el modo y grado de alteración (que se traduce por la presencia de fracción arcillosa más o menos importante y activa).

Es indispensable antes de comenzar cualquier trabajo con un suelo, tener el conocimiento más preciso posible, sobre:

- las características de los materiales que lo componen,
- los problemas que estos materiales van a generar, y
- las soluciones que pueden adaptarse (por ejemplo, el tratamiento de estabilización con cal).

Como norma general se puede señalar que para que la estabilización con cal sea eficaz, los suelos deben de ser plásticos, y en este sentido se considera que a partir de un Índice de Plasticidad, IP, igual o mayor que 10, el suelo es adecuado para reaccionar satisfactoriamente a su estabilización con cal, ya que esto es la clave para las reacciones químicas que proporcionan mejoras en las propiedades del suelo de forma inmediata y plazo.

La caracterización de un suelo se lleva a cabo por medio de dos tipos de parámetros, conocidos como parámetros de naturaleza y parámetros de estado (Foto 2).

Los parámetros de naturaleza se caracterizan porque no varían ni con el tiempo ni a lo largo de las manipulaciones

que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos, los más importantes son:

- La granulometría o finura, se evalúa mediante el diámetro máximo, y el porcentaje de partículas que pasa por el tamiz UNE 80 µm.
- La plasticidad, se evalúa mediante el Índice de Plasticidad (IP) y el Valor del Azul de Metileno (VA).
- El hinchamiento.

Los parámetros de estado no son propios de las características del suelo sino de las condiciones ambientales en que se encuentra. El parámetro de estado que en el caso de suelos sensibles determina todas las condiciones de los rellenos, terraplenes y explanadas es el *Estado Hídrico* que se mide por dos propiedades o valores:

- La compactación mediante el ensayo Proctor (Proctor Normal en terraplenes, y Proctor Modificado en explanadas), y
- La capacidad portante mediante el ensayo CBR ("California Bearing Ratio").

Una vez realizada la investigación de los suelos, es muy útil establecer una clasificación, por familias de materiales con comportamiento conocido, para establecer las condiciones de su empleo o utilización mediante tratamiento. Esta clasificación distinguirá los materiales rocosos de los suelos propiamente dichos y tendrá en cuenta el comportamiento de estos materiales a la hora de definir sus condiciones de empleo, utilización o tratamiento más adecuado para ello tanto en rellenos y terraplenes como en explanadas.

Existen diferentes clasificaciones de suelos, siendo las más utilizadas las que a continuación se mencionan y dentro de ellas, la denominación de los suelos en los que el tratamiento y estabilización con cal es adecuado figura en la Tabla 1:

- P.R.A ("Public Road Administration" U.S.A.).

P.R.A.	CASAGRANDE	L.C.P.C.- SETRA	PG3 (ART. 330)
A4	OL	A2	Inadecuados
A5	OH	A3	Próximos a tolerables
A6	CL	A4	
A7	MH	B6	Tolerables

Tabla 1. Suelos aptos para estabilizar con cal, según diversas clasificaciones.

- CASAGRANDE (elaborada por Arthur Casagrande; es la más conocida y adoptada por diversos organismos).
- L.C.P.C.- SETRA (elaborada por los organismos franceses L.C.P.C. - SETRA en los años setenta, viene contenida en la norma francesa NFP 11300).
- Artículo 330 del PG3 (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puertos del Ministerio de Fomento).

En la construcción de carreteras (ver Foto 3), el aprovechamiento de los suelos naturales de la traza puede presentar dificultades debido a:

- El alto contenido de agua.
- La presencia de arcilla en los mismos.
- A la combinación de ambos elementos.

La importancia del contenido de agua es conocida por todos ya que, si es demasiado elevado, hace que la circulación de máquinas en obra sea difícil cuando no imposible, y si es demasiado bajo la compactación resulta una operación difícil.

Los materiales que tienen arcillas en su composición, son conocidos por sus mediocres propiedades geotécnicas que, además, varían según las condiciones climáticas.

LA CAL

Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son cales aéreas que endurecen con el CO_2 presente en el aire. Están compuestas principalmente por óxido e hidróxido de calcio y de magnesio.

La cal es una sustancia química que se obtiene a partir de rocas calizas, compuestas mayoritariamente por carbonato cálcico (CaCO_3). Mediante la calcinación de la roca caliza, a unos $950 - 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$, en un horno de cal, se logra la descomposición del carbonato cálcico según la siguiente reacción química:



El óxido de calcio o *cal viva* CaO , se puede combinar con agua en el proceso de hidra-

tación, para dar lugar al hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) conocido como *cal apagada* o *cal hidratada*:



Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son *cales aéreas* que se caracterizan por:

- Endurecer lentamente al aire por la acción del CO_2 de la atmósfera.
- No presentar propiedades hidráulicas, es decir, no endurecer con el agua.

Para la estabilización de suelos, siguiendo la norma UNE 80502, deben de emplearse las siguientes clases y tipos de cales aéreas:

- *Cales vivas (Q)* que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio. Deberán emplearse los tipos CL 90-Q o CL 80-Q. Si el porcentaje de óxido de magnesio es superior al 5 %, se definen como *cales dolomíticas* o *dolomía calcinada*,
- *Cales hidratadas o apagadas (S)* que se componen principalmente de hidróxido de calcio y provienen de la hidratación controlada de cales vivas. Deberán emplearse los tipos CL 90-S o CL 80-S, y
- *Lechada de cal* que es la suspensión de cal apagada en agua. O bien también puede obtenerse a partir de la cal viva que al mezclarse con agua dará cal apagada, formándose a continuación con el resto del agua la suspensión de lechada de cal. La lechada de cal, que puede ser preparada en la propia fábrica o *in situ*,



Foto 3: Preparación del terreno para su estabilización con cal en el desdoblamiento de una carretera

puede utilizarse, aplicándose directamente sobre el suelo.

¿Qué ventajas ofrece cada una de estas formas? Veámoslo seguidamente:

- Ventajas de la cal viva:
 - Tiene mayor contenido de cal útil por unidad de masa que la cal hidratada. Para las cales altas en calcio, usadas en la estabilización de suelos según Norma UNE 80502/97, un 3% de cal viva equivale a un 4% de cal hidratada,
 - Reduce el contenido de humedad de los suelos húmedos,
 - Es más densa que la cal hidratada,
 - Lo anterior reduce los costes de almacenamiento y transporte, y
 - Por contra, la cal viva exige mayores medidas de seguridad durante su transporte y puesta en obra.
- Ventajas de la cal hidratada:
 - Tiene un tamaño medio de partícula mucho más pequeño que el de la cal viva molida y se dispersa rápidamente en el suelo durante el mezclado,
 - En condiciones de terreno seco, puede ser ventajoso añadir la cal hidratada o la lechada de cal si el resto del riego es suficientemente alto, y
 - Exige menos precauciones de seguridad que la cal viva.
- Ventajas de la lechada de cal:
 - Supresión del polvo producido en el extendido de la cal, y
 - Humidificación de los suelos secos.

Dado el carácter evolutivo de la cal en ambientes húmedos, se evitará la utilización de cales que hayan permanecido almacenadas en malas condiciones o cuando existan dudas sobre su buen estado de conservación y en tal caso se deberá verificar:

- Para las cales vivas: la reactividad al agua (su valor descenderá si ha habido hidratación y recarbonatación) y el contenido en CO₂.

- Para las cales apagadas: el contenido de CO₂ (un aumento de su valor indicará que ha habido recarbonatación) y la humedad a 110 °C.
- Para las lechadas de cal: sus características (esencialmente su concentración), vienen determinadas en función de las demandas reales de los materiales en el momento de los trabajos. Por lo tanto, solamente se medirá en ellas su concentración expresada en extracto seco (ES).

Además de las cales aéreas citadas existen otros estabilizadores basados en la cal, que son materiales que comportan en su composición una cantidad importante de cal, convenientemente fabricados para responder a las necesidades específicas de las técnicas de construcción de carreteras debiendo cumplir las normas o regulaciones técnicas de aplicación, antes de su utilización en la obra, tratándose, por lo general, de mezclas formadas por:

- escoria granulada de alto horno + cal + áridos,
- cenizas volantes silico - aluminosas + cal + áridos,
- cenizas volantes sulfo - cálcicas + áridos, y
- puzolanas molidas + cal + áridos.

Las cales a emplear en la estabilización de suelos vienen definidas por la Norma UNE-EN 459-1 *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*.

Se trata de una Norma armonizada para las cales para la construcción, lo que implica que las cales empleadas en la estabilización de suelos deberán contar con el Marcado CE para su comercialización según lo previsto en la legislación española por la transposición de la Directiva Europea de Productos para la Construcción .

Dicha Norma se complementa con las dos siguientes: la UNE-EN 459-2 *Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo* y la UNE-EN 459-3 *Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de la conformidad*.

Para asegurar la calidad de la cal utilizada en el tratamiento deben analizarse los siguientes parámetros:

- Contenido de componentes magnésicos y cálcicos.
- El contenido en óxidos de calcio y de magnesio, sobre muestra calcinada debe ser mayor del 90 por ciento en masa (CL-90).

CARACTERÍSTICAS	GRANO	MICRONIZADA
Contenidos en óxido de calcio y magnesio en muestras calcinada ^(a)	>90 % en masa	
Contenido en dióxido de carbono en el punto de fabricación	<5 % en masa	
Finura. Porcentaje acumulado retenido sobre: • Tamiz UNE 6,3 mm • Tamiz UNE 0,2 mm	0% --	0'1" <1 en;)
Reactividad. temperatura mínima: • Cal viva con MgO < 5% • Cal dolomítica con MgO > 5% El tiempo máximo para alcanzar la temperatura mínima en ambas	>60°C >50°C 25 minutos	

(a) La determinación se realizará sobre muestra previamente calcinada en horno eléctrico a 975°C ± 25°C

Tabla 2. Cal Clase I, según el PG3 del Ministerio de Fomento.

- Contenido de dióxido de carbono (CO₂) (< 5% en masa).
- Finura del molido mediante el análisis granulométrico, debiendo ser todas las partículas inferiores a 6,3 mm, y más del 90 por ciento inferiores a 0,2 mm.
- Reactividad de la cal.

La reactividad permite medir la velocidad ó cinética de reacción de la cal con el agua, midiendo el tiempo que se tarda en alcanzar una temperatura de 60 °C al agitar la muestra y debiendo ser dicho tiempo inferior a 25 minutos, siendo la cal más reactiva cuanto menor sea el tiempo y por ello, cuanto más alta sea la reactividad más rápida será su acción en la estabilización del suelo.

La reactividad de la cal es función de:

- la porosidad de la cal,
- del grado calcinación,

CARACTERÍSTICAS	
Contenidos en óxido de calcio y magnesio en muestras calcinada ^(a)	>90 % en masa
Contenido en dióxido de carbono en el punto de fabricación	<5 % en masa
Finura. Porcentaje acumulado retenido sobre: Tamiz UNE 0,2 mm	< 10 %

(a) La determinación se realizará sobre muestra previamente calcinada en horno eléctrico a 975°C ± 25°C

Tabla 3. Cal Clase II, según el PG3 del Ministerio de Fomento.

- de la materia prima (caliza) utilizada, y
- de la finura de la cal en el momento del ensayo.

La reactividad es un parámetro básico, especialmente por dos razones:

- Establece la calidad de la cal en cuanto a su capacidad de reacción (indica que las reacciones se producirán de forma rápida), y
- Permite estimar la eficacia de la cal para el secado de suelos húmedos.

También se deben de considerar en las cales para estabilización, lo previsto en los artículos 200 *Cales aéreas*, 204 *Cales para la estabilización de suelos*, y 510 *Suelos estabilizados in situ con cal* del *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*, (PG-3), vigente del Ministerio de Fomento reflejan lo anterior y las disposiciones normativas para la aplicación de la cal a la estabilización de suelos. Las Tablas 2 y 3 contienen un resumen de las mismas.

LA MEZCLA CAL Y SUELO

La cal aporta una solución interesante a la vez de económica a estos problemas, ya que:

- La aportación de cal viva permite secar los suelos excesivamente húmedos.
- Utilizándola en sus diferentes formas (viva, apagada o en lechada), mejora y estabiliza las características de los suelos arcillosos a corto y largo plazo.
- Permite utilizar los suelos de la traza reduciendo o evitando el impacto ambiental debido a la extracción de otros suelos o al vertido de los procedentes de las excavaciones de la traza.

Los efectos de la cal al mezclarse con los suelos arcillosos pueden ser divididos en dos grupos principales:

- Debidos a reacciones rápidas (minutos/horas); es una mejora por modificación inmediata que afecta a la humedad del suelo y a sus propiedades geotécnicas, mejorando su trabajabilidad y su comportamiento frente al agua (ver Foto 4).

- Provenientes de reacciones a largo plazo (semanas/meses); pueden asimilarse a una estabilización por cementación.

1. Mejoras por la modificación inmediata

Respecto a las modificaciones del estado hídrico dependen de la forma en que se encuentra la cal y del porcentaje aplicado. Si se emplea cal viva, ésta provoca un descenso inmediato de la humedad del suelo de aproximadamente del 3-4 % por cada 1% de cal viva mezclada, por el efecto combinado de los tres procesos siguientes:

- Hidratación de la cal viva,
- Evaporación de una cierta cantidad de agua, y
- Aporte de materia seca (cal en polvo, por vía seca), que reduce la relación peso de agua/peso de sólido, que define el cálculo de la humedad del material resultante.

En suelos demasiado húmedos, esta desecación mediante este secado durante la fase de mezclado se hace necesaria. Sin embargo en suelos con humedades cercanas a la óptima de compactación, o incluso menores, esta desecación deberá ser compensada con un aporte de humedad complementaria mediante riego, siendo la cantidad de agua a añadir del orden del 30 por ciento del peso de la cal aportada.



Foto 4: Al mezclarse la cal con suelos arcillosos se modifica la humedad del suelo y sus propiedades geotécnicas, mejora su trabajabilidad y su comportamiento frente al agua.

En lo que se refiere a las modificaciones de las características de la fracción arcillosa del suelo, la cal en un suelo arcilloso produce cambios iónicos y floculación de partículas debido a que actúa sobre las cargas eléctricas de las partículas arcillosas y modifica los campos eléctricos.

Una vez incorporada la cal en el suelo, las finas partículas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Este fenómeno se llama *floculación* y se explica por la formación de nódulos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entre las finas láminas de arcilla, que provocan un intercambio iónico de los iones Na^+ de los suelos por iones Ca^{++} de la cal.

En el laboratorio se comprueba por:

- disminución de la humedad natural del suelo (con cal viva),
- una disminución del Índice de Plasticidad (IP) o del Valor del Azul de Metileno (VA),
- aumento del límite plástico,
- disminución de la densidad máxima Proctor,
- un aumento del CBR, y
- un aplanamiento de la curva Proctor.

En el suelo se generan las siguientes acciones geotécnicas:

- Una elevación importante del límite plástico del suelo sin que varíe significativamente su límite líquido, lo que supone una reducción importante del índice de plasticidad, es decir el suelo arcilloso de una manera inmediata, cambia de un estado plástico y por tanto deformable y viscoso, a un estado sólido volviéndose más rígido y friable, mejorando así su puesta en obra.

En obra, se constata que los materiales húmedos pierden su carácter pegajoso y toman un aspecto arenoso. Su manipulación es más fácil y tanto su capacidad portante como su comportamiento en el extendido son netamente mejorados. En general una dosificación del orden del 1 % de cal viva es suficiente en algunos casos para conseguir estas modificaciones.



Foto 5: Tratamiento de estabilización con cal.

La razón para ello, es que se produce una reacción de tipo puzolánico: la cal eleva el pH del suelo estabilizado hasta valores superiores a 12, liberando sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos, incrementan la resistencia mecánica.

La duración de la reacción puzolánica en el suelo depende de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla. Se sitúa normalmente entre algunos meses y dos años.

Esta reacción de tipo puzolánico que es progresiva con el tiempo, aumenta:

- Los suelos arcillosos son, por lo general, muy expansivos, por lo que se hinchan en presencia de agua y cuando esta desaparece, disminuyen su volumen hasta el estado inicial. Esta expansividad se reduce o se anula debido al descenso de la plasticidad lo que genera una mejora de la estabilidad volumétrica del suelo.
- A la vez que se reduce la plasticidad y la expansividad, se produce un incremento de la resistencia a esfuerzo cortante del suelo que se traduce en una mejora inmediata de su capacidad de soporte (ensayo del material para obtener su índice de capacidad de soporte: inmediata, IPI)

2. Estabilización o mejora a largo plazo

La estabilización propiamente dicha consiste en una mejora a largo plazo (meses/años) por cementación, en función de la temperatura ambiente y de la naturaleza de la arcilla:

- aumentando la capacidad portante del suelo (lo que permite su empleo en capas de mayores exigencias),
- mejorando sus buenas propiedades estructurales en el tiempo, y
- haciendo que la capa estabilizada no sea sensible al agua y a los ciclos hielo-deshielo.

- la impermeabilidad,
- la resistencia mecánica, y
- la resistencia a las heladas del suelo tratado.

En el laboratorio se constata por:

- aumento adicional del C.B.R.,
- aumento de la resistencia al corte, a tracción y de compresión no confinada,
- una mejora de la estabilidad, disminuyendo la dilatación y la contracción, y
- una mejora de la resistencia a las heladas.

El mecanismo de estabilización es mucho más complejo que el de modificación, debido a que además de las dos variables que influyen en su desarrollo, es decir el tiempo y la reacción cal-arcilla, intervienen otros factores en la cinética del proceso de endurecimiento de las mezclas suelo-cal como son los siguientes:

- La temperatura ambiente. Se ha podido constatar que las resistencias alcanzadas al cabo de un año para una mezcla suelo-cal en condiciones de conservación a 20 °C pueden ser obtenidas normalmente, en menos de 30 días si la temperatura de conservación es del orden de

40 °C, y el proceso de endurecimiento se detiene cuando la temperatura desciende por debajo de 5 °C.

- La cantidad y naturaleza de la fracción arcillosa en el suelo. Cuanto más elevada sea esta cantidad, más rápida será la disolución de la sílice y de la alúmina y más importantes serán las cristalizaciones (en función de la disponibilidad de las cantidades necesarias de cal y de agua libre).

Algunos suelos, aunque se definan como arcillosos en el sentido geotécnico, no producen reacciones puzolánicas como es el caso de las arcillas sericitosas con alto contenido de mica procedentes de la alteración de los esquistos, lo que también ocurre cuando ciertas sustancias como materia orgánica, carbonatos alteran las condiciones químicas.

En todos estos casos, se debe realizar el oportuno estudio geotécnico para ver si por acción de la cal sobre el suelo se producen o no mejoras.

- El estado hídrico del suelo. La presencia en el suelo de una cantidad suficiente de agua libre es indispensable:
 - para asegurar la ionización con pH elevado del medio necesaria para la solubilización, y
 - para la hidratación de los compuestos que lleva a la cementación de las partículas granulares.

Por lo tanto en el proceso de estabilización se debe de tener en cuenta dos condiciones básicas:

- Los valores de las características mecánicas esperables a largo plazo para las mezclas suelo-cal varían mucho de un suelo a otro, razón por la que deben acometerse los estudios previos, aun cuando por su complejidad la estabilización a largo plazo no es una técnica de precisión, y
- Existe una dosificación máxima de cal, en función de la cantidad máxima *consumible* por la arcilla presente en el suelo, por encima de la cual las características mecánicas no pueden aumentar más e incluso corren el riesgo de empeorar.

ESTUDIO DE FORMULACIÓN Y DOSIFICACIÓN DE LA CAL

Considerando las numerosas variables que intervienen en la estabilización de suelos, cuando se proyecta estabilizar un suelo con cal es indispensable proceder a un estudio previo cuyo esquema y alcance dependen de los conocimientos que se tengan sobre el propio suelo y las anteriores experiencias de tratamiento.

El objetivo del estudio consiste en determinar el tipo de cal a emplear y las dosificaciones a aplicar en función de:

- Las características de los suelos, y
- El destino de los materiales tratados (rellenos, explanadas, bases/sub-bases, capas de rodadura).

Evidentemente, el estudio geotécnico y el conocimiento de las características del suelo lo más preciso posible tiene, en la mayoría de los casos, una importancia vital para el diseño y ejecución de la obra, siendo una de sus aplicaciones básicas la que sirve para realizar el estudio de formulación que indica la dosificación de cal más idónea y el tipo de ésta más conveniente por las características de la obra.

El estudio, a través de la ejecución de sondeos de reconocimiento y de pruebas de laboratorio, debe de pro-



Foto 6: Vista aérea de la zona a estabilizar con cal

porcionar una descripción de los suelos principalmente para (Foto 6):

- Su agrupamiento en familias homogéneas y representativas de acuerdo con la clasificación correspondiente, acotando las zonas de cada tipo de suelo así como los volúmenes disponibles del mismo.
- Determinar las características geotécnicas con su estado hídrico posible en el momento de los trabajos.

Asimismo, el estudio debe de indicar la presencia o no de los elementos susceptibles de influir en el tratamiento como:

- Materia orgánica,
- Sulfuros y sulfatos,
- Nitratos (abonos) , en el caso de prever un tratamiento mixto cal + cemento, y
- Cloruros (sal gema) etc, también para el caso de tratamiento mixto cal + cemento.

Mención especial merecen los sulfuros y los sulfatos, ya que cuando los compuestos totales de azufre, expresados como sulfatos sobrepasen el 1% en masa del suelo original pueden causar, en presencia de agua, una reacción secundaria que origine hinchamientos y fisuración de la mezcla estabilizada, por lo que en este caso se deberán realizar los ensayos oportunos en las condiciones más parecidas posibles a las que van a estar sometidos los suelos estabilizados en la obra.

La posibilidad de que las aguas subterráneas (que pueden contener sulfatos) penetren en el suelo estabilizado con cal tiene una importancia fundamental, para evitarlo, es esencial que el suelo estabilizado quede compactado con un porcentaje de huecos no superior al 5%, por lo que deberá prestarse una gran atención a la humedad del suelo en el momento de la compactación.

El estudio es fundamental a nivel del proyecto, puesto que de sus resultados se podrá deducir:

- Los materiales susceptibles de ser estabilizados y tratados con cal, y
- La dosificación de cal y el tipo más indicado de ésta.

De otra parte, el estudio de formulación consiste en analizar la evolución de los rendimientos mecánicos de la mezcla suelo-cal en función de:

- el tipo de cal (clase y dosificación),
- las características de la mezcla (densidad y humedad),
- tiempo de conservación, y
- modo de conservación (ambiente, inmersión, hielo, deshielo, etc).

El estudio de formulación debe de concluir con la elección de la cal apropiada y de las dosificaciones a usar en función de cada aplicación (terraplenes, explanadas, sub-bases, bases, capas de rodadura) y de las prestaciones exigidas para cada tipo de aplicación.

La dosificación de producto se expresa mediante el porcentaje que representa la masa del producto de tratamiento en relación con la suma de las masas de los productos secos presentes en la mezcla, según:

$$d\% = Q \cdot 100 / (M_{ss} + Q + m_{cg})$$

Donde:

- Q es la masa del producto de tratamiento (cal),
- MSS es la masa de suelo seco o eventualmente pretratado (ej. con cal), y
- m_{cg} es la masa, en su caso, del corrector granulométrico.

El procedimiento para encontrar la dosificación óptima de la cal, se basa en criterios de resistencia. El más utilizado es el índice de resistencia CBR.

Asimismo, se comparan los CBR del suelo sin estabilizar y el del suelo estabilizado con una dosificación de cal que permita obtener el CBR exigido para el suelo tratado. Esta comparación permitirá conocer la mejora del suelo conseguida con el tratamiento.

El procedimiento puede tener operativas diferentes según se trate el material para terraplén o para explanadas.

Un método rápido para determinar el porcentaje de cal con cierta aproximación es el que viene dado en la Norma A-55.M. C-977

1. Terraplenes

En el caso de terraplenes, se busca la dosificación de cal capaz de conferir, al suelo a estabilizar, una capacidad

portante inmediata y suficiente que permita soportar el tráfico de la obra y conseguir las compactaciones proyectadas. Es la aplicación privilegiada de la cal viva.

Se puede utilizar la evolución del Índice Portante Inmediato (CBR sin sobrecargas), según la Norma Francesa NFP 94078, en función de la dosificación de cal para diferentes contenidos de agua representativos del estado natural.

También se puede buscar la dosificación en cal necesaria para que el suelo, tratado y compacta la energía del ensayo Proctor Normal, alcance un valor CBR (obtenido con punzonamiento inmediato a la confección de la probeta), suficiente para permitir una puesta en obra en buenas condiciones. El valor del CBR admisible generalmente está comprendido entre 5 y 15 según las características de la obra.

Las dosificaciones de cal viva expresadas como porcentaje del suelo seco, normalmente recomendadas varían entre 1 y 3% según el contenido de agua del suelo, o entre 2 y 4% de cal hidratada.

2. Explanadas

En el caso de explanadas, cuando las arcillas del suelo reaccionan particularmente bien con la cal (caso de ciertas margas y margas-caláceas) se obtienen, después del tratamiento, unos resultados mecánicos suficientes para autorizar su utilización en aquellas, en estos casos se recomienda que:

- si el suelo está demasiado húmedo se use la cal viva para conferirle en primer lugar una capacidad portante inmediata, indispensable para una correcta circulación por la obra, y
- si el suelo está seco se recurra a la cal apagada o a la lechada de cal.

En los dos casos, se estudia la evolución del CBR, después de la inmersión de las probetas durante cuatro días en agua, en función de la dosificación de cal para distintos contenidos en agua. En regiones templadas, sometidas a heladas poco intensas, la experiencia muestra que un $CBR > 20$, obtenido tras la inmersión en agua, es suficiente para la utilización de estos materiales.

En cualquier caso se busca la dosificación capaz de conferir al suelo a estabilizar:

- Para que si la humedad natural elevada, la capacidad portante inmediata sea suficiente para autorizar el tráfico sobre la obra.

- La resistencia mecánica final exigida para un material de explanada.


Sin embargo, es utópico buscar una estabilización única que responda a éstas dos exigencias ya que el contenido natural en agua de los suelos es raramente constante y homogéneo.

La experiencia en este campo asegura que un pre-tratamiento con cal de los suelos arcillosos húmedos o secos facilita notablemente el tratamiento con otros ligantes hidráulicos (tratamientos mixtos) y mejora en gran medida el nivel de los rendimientos finales.

En este caso, el estudio se descompone en dos fases sucesivas:

- Búsqueda de la capacidad portante inmediata (el estudio se realiza como el de la cal para terraplenes), y
- Búsqueda de la resistencia mecánica exigida, se estudia la evolución de la resistencia mecánica del suelo tratado a 7, 28, incluso a 90 días según la rapidez de la reacción en función de la dosificación del cemento y de otros aspectos, siendo el parámetro de medida, habitualmente considerado, la resistencia a compresión (R_c) medida en probetas cilíndricas, considerándose admisibles $R_c > 1$ a 2 MPa (correspondientes aproximadamente a $R_t > 0,1$ a 0,2 MPa).

3. Bases y subbases

En el caso de las subbases y de las bases, la tarea es la misma que la citada para las explanadas, pero generalmente con niveles de exigencia más altos. Los estudios son más amplios, ya que se presta un mayor interés a la resistencia a tracción R_t del material asociado al módulo de deformación E_t , parámetros utilizados en el dimensionamiento de carreteras; e incluso si es conveniente se procede a un estudio de comportamiento a la fatiga. 



Los impactos sobre el territorio, ocupación y fragmentación



Justo BORRAJO SEBASTIÁN

*Jefe del Área de Carreteras de Gran Capacidad
Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento*

RESUMEN

La biodiversidad es un concepto globalizador, con las ventajas e inconvenientes que esto plantea para su estudio. Garantizar su conservación es fundamental en un enfoque preventivo a largo plazo, que debe comenzar desde las etapas más tempranas de la planificación y establecer un sistema de áreas protegidas, complementado con unos corredores biológicos que permitan su conectividad.

El transporte, principalmente a través de sus grandes infraestructuras, puede producir unos graves efectos negativos sobre la biodiversidad con la ocupación de suelos; alteraciones del relieve, la hidrología y la atmósfera; contaminación acústica del aire, suelos y aguas; sobreexplotación de recursos no renovables; destrucción de la capa de ozono; riesgos del transporte de sustancias peligrosas y emisiones que provocan el calentamiento global y el cambio climático.

Los efectos principales sobre la diversidad biológica son la pérdida de efectivos y la fragmentación de poblaciones, la disminución de la diversidad genética y los ecosistemas. En este artículo se pasa revista principalmente a la fragmentación y ocupación del hábitat y a las medidas para reducir dichos impactos, así como a los trabajos realizados por el Grupo de Trabajo sobre Fragmentación de Hábitats causada por infraestructuras de transporte.

Palabras clave: Biodiversidad, Infraestructura de transporte, Fragmentación, Medioambiente, Planificación viaria, Impacto mediambiental, Evaluación medioambiental, Ecología.

La *biodiversidad* o *diversidad biológica* es la variedad y variabilidad de los organismos vivos y los ecosistemas de los que forman parte, siendo el concepto más utilizado en el campo de la conservación por su carácter globalizador, permitir considerar a la naturaleza como un todo y estudiar los efectos sobre ella del mundo que estamos construyendo. En torno a la biodiversidad se plantean dos objetivos bastante antagónicos: su conservación y su utilización, que se tratan de conciliar con el tan manoseado concepto de *uso sostenible* o *sostenibilidad* y que, en general, se resuelve con la victoria del denominado desarrollo sobre la conservación, olvidando que los recursos biológicos son imprescindibles no solo porque proporcionan alimentos y medicinas, sino también beneficios sociales, culturales y ambientales que hacen que la conservación de la biodiversidad no sea solo una obligación ética, sino también una necesidad de supervivencia.

La respuesta institucional que ratifica el concepto de biodiversidad, en el que la naturaleza deja de verse como un conjunto de componentes aislados y se considera como un conjunto global de ecosistemas interrelacionados, se produce en el *Convenio sobre la Diversidad Biológica*, firmado en la *Conferencia de las Naciones Unidas de Medio Ambiente y Desarrollo*, celebrada en Río de Janeiro en 1992. España ratificó dicho Convenio en 1993, estableciendo el actual *Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino*, una *Estrategia para la Conservación y el Uso Sostenible de la Diversidad Biológica*. En ella se estableció un marco general para la política nacional de conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica, se diagnosticó el estado de la biodiversidad, se identificaron los procesos que están causando su deterioro y los sectores que los provocan y se indicaban las directrices y medidas que deberían seguir los futuros planes sectoriales y programas específicas del Estado, CC.AA., Corporaciones Locales y sociedad en general.

En lo que se refiere al tema de este artículo los principales principios orientadores son los de prevención y planificación:

- La prevención exige pensar a largo plazo, basándose en un diagnóstico dinámico del estado de conservación del medio y en la predicción de los efectos sobre éste de las actuaciones que pretendamos realizar.

- La planificación del territorio y la evaluación ambiental, tanto de planes o programas como de proyectos, son los instrumentos fundamentales para incorporar los objetivos de sostenibilidad en las primeras etapas de la toma de decisiones.

Para garantizar la conservación de la diversidad biológica es necesario que el establecimiento de un sistema de áreas protegidas se complemente con el de unos corredores biológicos que garanticen su conectividad. El transporte, principalmente a través de sus grandes infraestructuras, puede producir unos graves efectos sobre la biodiversidad con su:

- ocupación de suelos;
- alteraciones del relieve, la hidrología y la atmósfera;
- contaminación acústica, del aire, suelos y aguas;
- sobreexplotación de recursos no renovables;
- destrucción de la capa de ozono;
- riesgos del transporte de sustancias peligrosas, y
- emisiones que provocan el calentamiento global y el cambio climático.

Los efectos principales de las alteraciones anteriores sobre la diversidad biológica son la pérdida de efectivos



Foto 1. Paso de fauna específico para corzo.

y la fragmentación de poblaciones, la disminución de la diversidad genética y la fragmentación, modificación y destrucción de hábitats y ecosistemas.

LA FRAGMENTACIÓN Y OCUPACIÓN DEL HÁBITAT

Las redes de transporte ocupan y dividen los hábitats naturales dando lugar a fragmentos más aislados al crear barreras entre ellos, lo que produce dos efectos principales sobre las especies:

- la reducción del tamaño de los fragmentos y su formato que da lugar a que puedan no ser viables como soporte de las especies más sensibles, y
- la reducción de la conectividad entre los fragmentos, que puede hacer que el desplazamiento de los animales entre ellos se dificulte o imposibilite.

En ambos casos, determinadas especies corren peligro de extinción, lo que conlleva efectos globales negativos sobre la diversidad biológica.

Las infraestructuras de transporte, principalmente carreteras y ferrocarriles, tienen efectos ecológicos primarios y secundarios que pueden afectar de forma negativa a la biodiversidad. Entre los primarios podemos citar la pérdida de hábitat, el efecto barrera, la mortandad causada por colisiones con vehículos, las molestias y contaminación y la función ecológica de los márgenes. Entre los secundarios, los cambios de usos del suelo, el incremento de asentamientos humanos e industriales y el aumento de la frecuentación. Además, estos efectos están en gran medida asociados, lo que provoca que sus consecuencias sinérgicas sean superiores.

La ocupación de terreno por la infraestructura es la causa directa más evidente de la pérdida de hábitat, además este efecto se agrava al considerar que no se inutiliza solo el espacio físicamente ocupado sino que las molestias del ruido y la contaminación extienden dicho efecto a zonas mucho más amplias lindantes con las infraestructuras.

En España las carreteras y sus bandas de afección ocupan cerca del 1,5 por 100 de la superficie total del país, lo que si en términos absolutos puede parecer poco importante sí lo puede ser localmente.

Sobre la amplitud de la banda afectada junto a las infraestructuras de carreteras se han realizado muchos estudios con resultados muy variables que van desde las

decenas hasta los centenares de metros, e incluso hasta kilómetros dependiendo del impacto y considerando las condiciones físicas y climáticas del entorno, los hábitats afectados y la geometría y el tráfico de la carretera.

El efecto barrera puede ser uno de los impactos negativos más importantes de las infraestructuras de transporte terrestre, ya que la capacidad de dispersión de los organismos vivos es uno de los factores más importantes para la supervivencia de las especies. La capacidad para desplazarse por el territorio, en busca de comida o refugio o para reproducirse, se ve afectada negativamente por las barreras que, a veces, suponen las infraestructuras.

Las carreteras y ferrocarriles pueden suponer barreras físicas o de comportamiento para algunos animales en determinadas condiciones de diseño y uso. No es lo mismo una carretera convencional con una intensidad de tráfico inferior a 4.000 vehículos/día, que solo supondrá una barrera para las especies más sensibles, que una autopista con más de 10.000 vehículos/día impermeable para la mayoría de las especies si no se planifica y proyecta su trazado con cuidado y se adoptan medidas correctoras de diseño, de cerramientos y pasos de fauna. Además, muchas especies de animales evitan las zonas próximas a las carreteras por las molestias derivadas de las actividades humanas, lo que aumenta el efecto barrera físico de las mismas.

La alteración de las características ecológicas de los hábitats adyacentes a las vías de comunicación terrestre inducen cambios en la forma en que son utilizados por la fauna y la flora. Los cambios hidrológicos producidos por los movimientos de tierra pueden secar acuíferos, producir inundaciones o erosionar los suelos, lo que influye de manera muy directa sobre la vegetación y fauna asociados. Los contaminantes químicos (metales pesados, sodio y cloro de las sales fundentes, monóxido y dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos de los gases de escape) también tienen importantes efectos sobre los suelos, la vegetación y la fauna.

El ruido del tráfico afecta sobre todo a las personas, pero también a numerosas especies de animales que no se acercan a las carreteras. La iluminación nocturna puede afectar a la mortandad de insectos lepidópteros (de todos es conocido el caso de las mariposas nocturnas asociadas a los coscojales de Aranjuez y sus problemas con las variantes de dicha población).

La mortalidad por atropello es responsable de solo una pequeña parte (menor del 4 por 100) de la mortalidad de las especies más comunes (conejos, roedores, gorriones

nes, etc.), pero puede ser un factor importante y significativo para la supervivencia de la población local o global de algunas especies sensibles o en peligro de extinción como puede ser en nuestro país el linco ibérico. El número de accidentes con aves también puede ser importante, sobre todo en carreteras que cruzan o bordean humedales o que interceptan zonas de paso como las existentes entre bosques y pastizales.

En general, las especies más sensibles a las barreras de las carreteras son las poco comunes con pequeñas poblaciones locales y amplias áreas de campeo (oso, linco, etc.) y las que realizan desplazamientos diarios o estacionales entre distintos hábitats locales (principalmente algunas aves, ciervos y jabalíes en nuestro país). En otros países europeos también tienen importancia las especies que, como el alce o el reno, tienen que realizar grandes migraciones anuales.

Conviene destacar el valor de los márgenes de las infraestructuras lineales, ya que pueden constituir un nuevo hábitat para algunas especies, con los efectos positivos y negativos a que puede dar lugar. Así, si se gestionan bien, pueden constituir refugios para determinadas especies, aumentando las zonas de vegetación natural en zonas densamente pobladas con escasez de las mismas, pero también pueden conducir a los animales a zonas donde la mortalidad es más elevada, e incluso pueden servir de corredor de propagación de especies invasoras, como ha ocurrido con el senecio de El Cabo en España.

Por último, entre los efectos ecológicos secundarios los cambios de uso del suelo a que dan lugar las infraestructuras, sobre todo de carreteras por la mayor accesibilidad al territorio que proporcionan, pueden intensificar los efectos negativos en la conservación de la diversidad biológica que ya de por sí genera la red de infraestructuras. Así, la urbanización del territorio y el turismo con su mayor frecuentación humana asociada, potenciada por la mayor accesibilidad al territorio que plantean las carreteras, sobre todo las de gran capacidad, son fenómenos muy preocupantes en cuanto a la conservación de la biodiversidad.

La combinación de efectos que se han descrito conlleva la fragmentación y ocupación de hábitats cuyo efecto global debe contemplarse en un contexto paisajístico amplio que conlleva la pérdida y aislamiento de los mismos y los cambios en el uso del suelo próximo a las vías. Los estudios sobre el efecto de las carreteras sobre el paisaje, entendido como fenosistema o parte percepti-



Foto 2. Plantaciones de ocultación de vallado.

ble de los ecosistemas, y sobre los efectos ecológicos a gran escala se encarga la ecología del paisaje que, en estos momentos, todavía no está muy desarrollada en nuestro país, aunque existen esfuerzos significativos como, por ejemplo, los realizados por Díaz Pineda y otros^(v), sobre paisaje cultural y estructura socioeconómica y su aplicación a un territorio de Almería, donde se cuantifica el impacto y las potencialidades de las actividades turísticas.

MEDIDAS PARA REDUCIR LOS IMPACTOS DE LA OCUPACIÓN Y FRAGMENTACIÓN DE HÁBITATS

Las medidas que deben promoverse para reducir los efectos negativos de la ocupación y fragmentación de hábitats parten de tres principios básicos: prevención, corrección y compensación^(m). Además, es necesario un seguimiento que permita establecer la eficacia de las medidas adoptadas y asegurar que se alcanzan los objetivos propuestos.

En la fase de prevención la herramienta fundamental es la planificación a diferentes escalas: planes, programas, estudios y proyectos, incluyendo tanto nuevas infraestructuras como la mejora de las existentes. La *Evaluación Ambiental de Planes y Programas* y la *Evaluación de Impacto Ambiental* de estudios y proyectos son las herramientas técnico-administrativas utilizadas para garantizar que los aspectos ambientales, entre ellos la ocupación y fragmentación de hábitats, son considerados en la toma de decisiones sobre qué actuaciones deben realizarse y con qué trazado.

Decididas las actuaciones a realizar y sus trazados ambientalmente viables en cuanto a ocupación, es necesario diseñar las medidas correctoras y, en su caso, compensatorias que mitiguen los impactos negativos de la fragmentación asegurando una permeabilidad transversal adecuada.

Las medidas para reducir la fragmentación de los hábitats son de dos tipos:

- las que reducen directamente la fragmentación: pasos adaptados de drenaje o vías pecuarias y pasos específicos de fauna (Foto 1), y
- las que mejoran la seguridad de la carretera y evitan los atropellos de animales (vallados, gestión de márgenes, dispositivos de escape, etc. Foto 2).

1. La fragmentación en los Planes y Programas

En los estudios técnicos realizados para la preparación de un *Plan Sectorial de Carreteras* que desarrolle el *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) 2005-2020*, y dentro del *Informe de Sostenibilidad Ambiental*, se ha evaluado la afección a la biodiversidad mediante indicadores que tienen en cuenta los parámetros de ocupación, densidad de espacios en las cercanías y afección a los mismos, fragmentación del territorio y afección a la fauna.

Para la cuantificación de la ocupación se ha considerado una banda de 50 m, mientras para la afección se tienen en cuenta bandas de 100 m, 200 m y 1000 m. La situación de partida se ha valorado para los espacios de la Red Natura 2000 (LIC y ZEPA), Humedales Ransar, Reservas de la Biosfera, IBA, Hábitats prioritarios, Espacios Protegidos de las CC.AA. y Parques Nacionales. La ocupación total actual es relativamente baja en valores absolutos, ya que no se supera en ningún caso el 0,4 por 100 de la superficie total de las diferentes categorías.

La realización de todas las actuaciones previstas en el PEIT no afectará por ocupación en ningún caso a la categoría de Parques Nacionales, pero sí a numerosos espacios de la Red Natura 2000 (68 ZEPA y 38 LIC) así como a 24 hábitats prioritarios y 26 Espacios Naturales protegidos de las CC.AA. La afectación de estos mismos espacios u otros cercanos depende de los trazados y de la franja de afección que se considere.

Como el Plan Sectorial de Carreteras (PSC) no ha sido aprobado y algunas de las actuaciones previstas en el

Tipo I:	hábitats costeros y vegetaciones talofíticas
Tipo II:	dunas marítimas y continentes
Tipo III:	hábitats de agua dulce
Tipo IV:	brezales y matorrales de zona templada
Tipo V:	matorrales esclerófilos
Tipo VI:	formaciones herbosas naturales y seminaturales
Tipo VII:	turberas altas y bajas, y áreas pantanosas
Tipo VIII:	hábitats rocosos y cuevas
Tipo IX:	bosques

Tabla 1: Tipos de hábitats básicos según la Directiva 92/43.

PEIT han sido o podrán ser descartadas por la Evaluación de Impacto Ambiental (caso de la autopista de peaje Toledo-Ciudad Real-Córdoba), no es posible cuantificar la afección potencial sobre la biodiversidad que produciría un hipotético PSC.

En cuanto a la fragmentación, definida como el proceso de división de hábitats continuos en fragmentos que a medida que se hacen más pequeños quedan más aislados entre sí y que, en conjunto, ocupan solo una fracción de la superficie original, se ha partido del *Inventario Nacional de Hábitats* clasificándolos, de acuerdo con la *Directiva 92/43*, en los nueve tipos básicos de la Tabla 1.

Como indicadores de fragmentación se ha considerado el número de teselas afectadas, su área media y la relación entre perímetro y área. Si el porcentaje de variación de los indicadores es elevado nos indica que el área de hábitats es muy pequeña o que se le afecta en mucha superficie, debiéndose evitar en ambos casos la actuación.

La fragmentación afecta de modo desigual a los diferentes tipos de hábitats, siendo los más afectados las dehesas de encinas, los bosques de "castanea sativa" y los ríos alpinos con vegetación leñosa en sus orillas de "myricaria germanica" y "salix elaeagnos" (Anexo I de la *Directiva 92/43*). En la mayoría de los hábitats afectados se produce un aumento del número de teselas inferior al 5 por 100, lo que en valor absoluto no es muy elevado.

En cuanto a la superficie afectada, indicador que aporta una información muy buena a la hora de analizar la posible fragmentación, los resultados indican que la pérdida en la práctica totalidad de los mismos es inferior al 1 por 100 de su superficie. Los hábitats más afectados vuelven a ser los ríos alpinos con vegetación leñosa en sus orillas, que pueden resultar gravemente afectados sobre todo si se considera que su área en la península es reducida.

Considerando la relación perímetro-área, indicador que trata de cuantificar la influencia de la forma de las teselas lo que puede tener importancia en algunos procesos ecológicos, la mayoría de los hábitats no la ven modificada de forma significativa (en ningún caso se supera el 2 por 100 de variación).

En conclusión y considerando los tres indicadores calculados, se puede decir que la fragmentación por la realización de las actuaciones de carreteras previstas en el PEIT no será importante en valores absolutos para la mayoría de los hábitats, aunque si puede serlo en algún caso particular y sobre todo para los hábitats de bosques de "castanea sativa" y los ríos alpinos con vegetación leñosa en sus orillas de "myricaria germanica" y "salix elaeagnos", que son los más afectados en los tres indicadores.

Para valorar los efectos sobre la fauna de un posible Plan Sectorial de Carreteras que desarrolle el PEIT se han considerado tanto las especies de interés comunitario (Anejos de la *Directiva Hábitats* y Anexo II de la *Directiva Aves*), como las especies de protección estricta que conforman los elementos básicos de la Red Natura 2000, y las que se encuentran en las categorías de *en peligro de extinción* y *vulnerables* en el *Catálogo Nacional de Especies Amenazadas*.

Además, se ha estudiado de forma pormenorizada la afección a los cinco taxones de vertebrados que disponen de planes de recuperación a nivel nacional: lince ibérico, oso pardo, quebrantahuesos, urogallo cantábrico y águila imperial. Las vías de gran capacidad que mayor afección podrían producir son la autopista de peaje Toledo-Ciudad Real-Córdoba y la autovía Linares-Albacete, sobre el lince ibérico y el águila imperial. La primera ha sido declarada ambientalmente no viable por la *Declaración de Impacto Ambiental (DIA)* de 29 de mayo de 2007, que concluye que el proyecto es incompatible con la conservación de hábitats y especies de interés prioritario y amenaza la integridad de la Red Natura 2000.

La autovía Linares-Albacete recibió una DIA positiva el 21 de noviembre de 2006 tras un estudio complementario sobre la afección al lince ibérico que varió el trazado e introdujo numerosos pasos de fauna y medidas compensatorias de revegetación de las vaguadas y cauces de agua en los que se implantaron los pasos de faunas específicos. El trazado se trasladó de la ladera, por la que inicialmente discurría, hacia una llanura septentrional, considerando los expertos que los lince utilizaban la ladera como zona de campeo, en la que era difícil predecir sus movimientos, y la llanura era únicamente lugar de paso hacia otras zonas, por lo que sus desplazamientos por la misma eran más previsibles

y se podían disponer las medidas adecuadas para evitar los atropellos.

Por último, parece oportuno recordar que en la fase de redacción de planes y programas no hay que limitarse a evaluar los previsibles efectos sobre la biodiversidad de los programas de creación de nuevas infraestructuras, sino que deben incluirse programas o subprogramas de integración ambiental de las infraestructuras existentes. Así, en los estudios para un Plan Sectorial de Carreteras que desarrolle el PEIT y dentro del Programa de Conservación y Explotación se propone incluir un subprograma de calidad ambiental con actuaciones para mejorar la integración territorial, paisajística y ambiental de las carreteras existentes, tales como pasos específicos de fauna, mejora de la permeabilidad transversal, plantaciones en las márgenes e integración ambiental de los cauces afectados por las obras de drenaje.

2. Medidas correctoras y compensatorias

Antes de disponer medidas correctoras y compensatorias es necesario estudiar si existe un trazado que las haga innecesarias, pues la auténtica política de protección de la biodiversidad es la preventiva.

Para ello, en la fase de estudio informativo de las carreteras y ferrocarriles se realiza una caracterización del territorio que detecta los hábitats y espacios sensibles que, si es posible, no deben ser atravesados por la infraestructura, y la planta y el perfil que permiten una menor afección al paisaje.

Únicamente después de este ejercicio hay que pensar en las medidas correctoras y compensatorias. Como ya expusimos al principio del apartado *Medidas para reducir los impactos de la ocupación y fragmentación de hábitats* las actuaciones para proteger a la fauna de los impactos de las infraestructuras lineales de transporte y reducir la fragmentación del hábitat son de dos tipos:

- las que reducen directamente la fragmentación conectando los hábitats atravesados por la infraestructura, y
- las que mejoran la seguridad de la carretera y reducen la mortalidad de los animales por colisiones con los vehículos.

No hay que olvidar que algunas medidas pueden pertenecer a ambos grupos y que, además, pueden tener efectos contradictorios, como los vallados que aunque reduzcan los atropellos aumentan la fragmentación,

sobre todo si no se disponen los pasos transversales suficientes.

Aunque la disposición de pasos específicos para la fauna está cada vez más extendida, no hay que olvidar que la adecuación de los pasos superiores o inferiores y los drenajes pueden cumplir también de forma eficaz dicha función y que su adaptación para que sirvan también a la misma es mucho menos costosa (Foto 3).

Un aspecto que consideramos poco estudiado al menos en la fase de planificación, es la ubicación de los pasos de fauna, pues es preciso que se estudien *in situ* los corredores de fauna, para que su eficacia sea real. De los estudios, poco numerosos, realizados sobre utilización de los pasos específicos de fauna en la fase de explotación de las carreteras parece deducirse que su eficacia es baja en muchos casos, por su mala ubicación o su diseño poco adecuado.

Para elegir el tipo de paso más adecuado a cada caso hay que tener en cuenta el paisaje, los hábitats afectados y las especies a las que van destinadas las medidas. Así, no es lo mismo el paso necesario para mantener la permeabilidad de un corredor regional de grandes mamíferos, para lo que será necesario un gran ecoducto, que mantener el corredor de migración de una población local de anfibios, para lo que bastará con la adaptación de un pequeño drenaje (ver Foto 3) .

Otro aspecto importante a considerar en la disposición de medidas correctoras es la densidad de pasos de fauna necesaria. Decidir el número y tipo de medidas dependerá de las especies existentes y la distribución de hábitats en la zona. En unos casos bastará con un número pequeño de grandes pasos y en otros será mejor disponer un mayor número de pequeñas dimensiones.

Otro aspecto importante, y a veces descuidado, es el mantenimiento de los pasos, sobre todo los de drenaje. Parece oportuno que en los contratos de conservación integral de las carreteras estatales se dé cada vez mayor importancia a estas tareas, incluyendo informes específicos sobre la eficacia de las medidas correctoras adoptadas.

En cuanto a la aplicación de medidas compensatorias hay que destacar en primer lugar su carácter de excepcionalidad, es decir solo deben utilizarse cuando hayan fracasado las preventivas y correctoras. Su aplicación incluye no solo los casos de pérdidas de hábitats sino los casos en que su degradación afecte a sus funciones.



Foto 3. Obra de drenaje ampliada a bóveda y con acera para paso de reptiles y anfibios.

En España no existe legislación sobre medidas compensatorias y solo es aplicable la europea: *Directivas de Aves (1979)* y *de Hábitats (1992)*. Aunque no existe todavía mucha experiencia en nuestro país sobre aplicación de medidas compensatorias, parece oportuno destacar algunas que se han realizado últimamente.

Así, son frecuentes los convenios con las CC.AA. para la transferencias de fondos que permitan la adquisición de terrenos que aseguren su funcionalidad actual (caso de la Autovía Trujillo-Cáceres), o los recuperen para la creación de hábitats con mayor riqueza ecológica (caso de la Autovía del Mediterráneo entre Motril y el límite con la provincia de Almería donde se pretende evitar o limitar la implantación de invernaderos).

También son frecuentes medidas como la implantación de nidos artificiales para cernícalos, construcción de charcas, repoblación de conejos y plantaciones de alfalfa que sirvan de base alimentaria a rapaces o linceas, instalación de sistemas de prevención de electrocución en tendidos eléctricos existentes, sustitución de cercas de espino por malla ganadera, etc.

Por último, hay que señalar que, en cumplimiento de las Declaraciones de Impacto Ambiental que incluyen la obligatoriedad de ejecutar un programa de seguimiento para conocer el funcionamiento de las medidas de protección de la fauna, se están realizando por la *Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento* contratos específicos. Los controles se llevan a cabo mediante obtención de imágenes con cámaras activadas por barreras de infrarrojos y detección de rastros sobre polvo de mármol, tanto en pasos de fauna específicos como en otros pasos, drenajes y túneles.

También se llevan controles sobre la mortalidad por atropello en la propia carretera.

GRUPO DE TRABAJO SOBRE FRAGMENTACIÓN DE HÁBITATS CAUSADA POR INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE

El Grupo de Trabajo está integrado en la *Comisión Nacional de Protección de la Naturaleza* e incluye representantes de todas las administraciones de transporte y medio natural, tanto de las CC.AA. como de la Administración Central, así como de otras entidades implicadas en el tema. Las reuniones se celebran en la *Dirección General para la Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente*, que ostenta la secretaría técnica del Grupo.

En la última reunión del Grupo, a la que asiste regularmente un representante de la *Dirección General de Carreteras*, se presentó la publicación del *Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Prescripciones Técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales*^(vi), redactado a partir de las directrices del manual europeo *COST 341 Fauna y Tráfico*, y está en redacción una segunda publicación sobre prescripciones técnicas para el seguimiento y evaluación de la efectividad de los pasos de fauna. El año 2008 está prevista la publicación de un documento sobre prevención de la fragmentación de hábitats en la fase de planificación de infraestructuras.

Las *Prescripciones Técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallado perimetrales*^(vi), incluyen en una serie de fichas con fotografías de realizaciones y las prescripciones técnicas para el diseño correcto de once tipos de pasos de fauna adecuados para distintos grupos taxonómicos y contextos paisajísticos. Se establecen las dimensiones mínimas y recomendadas para cada tipo. Además:

- se describen las dimensiones y características de los accesos (ficha 112) y de la superficie del paso,
- se muestran ejemplos de los errores y malas prácticas más frecuentes que comprometen la eficacia de estas estructuras, y
- se incluyen fichas sobre:
 - vallados perimetrales (nº 13 para grandes mamíferos y nº 14 para pequeños vertebrados),
 - sistemas de escape (ficha 15, ver Foto 4),
 - gestión de la vegetación de los márgenes (ficha 16),
 - refuerzo de la señalización de advertencia (ficha 17),
 - dispositivos disuasorios (ficha 18),
 - señalización de pantallas transparentes para evitar la colisión de aves (ficha 19), y



Foto 4. Dispositivo de escape.

- adaptación de arquetas, cunetas y otros elementos que puedan causar mortalidad de fauna (ficha 20).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Delibes de Castro, M. (2006): "Carreteras, hábitat y biodiversidad. Integración Ambiental". Revista Carreteras.
- II. "Estrategia Española para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica". Dirección General de Conservación de la Naturaleza
- III. "Fauna y Tráfico. Manual europeo para la identificación de conflictos y el diseño de soluciones" (2005). Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente.
- IV. "Pasos de fauna para vertebrados. Minimización y seguimiento del efecto barrera de las vías de comunicación" (2006). Centro de Publicaciones. CEDEX.
- V. Pineda, F.D. et al. (2005): "Paisaje Cultural y Estructura Socioeconómica". Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía
- VI. "Prescripciones Técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales" (2006). Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente.
- VII. Rosell, C. et. al (2003): "La fragmentación del hábitat en relación con las infraestructuras de transporte en España".

Estudio comparativo de la fatiga de betunes y mezclas bituminosas



Oscar REYES ORTIZ

Félix PÉREZ JIMÉNEZ

Rodrigo MIRÓ RECASENS

Alfredo HERNÁNDEZ NOGUERA

Profesor. Universidad M. Nueva Granada
Bogotá-Colombia
Doctorando de la UPC
Catedrático
Universidad Politécnica de Cataluña (U.P.C.)
Catedrático
Universidad Politécnica de Cataluña (U.P.C.)
Ingeniero Civil
Doctorando de la U.P.C.

RESUMEN

Uno de los fallos más comunes de las mezclas bituminosas es la fatiga, razón por la cual muchos autores han investigado este fenómeno, basándose fundamentalmente en estudios individuales sobre el betún o sobre la mezcla bituminosa. El objetivo de este trabajo es establecer una correlación entre el comportamiento a fatiga de los betunes con el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas fabricadas con ellos. Para ello, se han determinado las leyes de fatiga de diferentes betunes convencionales y modificados con polímeros mediante ensayos en el reómetro de corte dinámico (DSR) y las de las correspondientes mezclas a partir de ensayos a flexotracción dinámica.

Palabras clave: *Fatiga, Betún, Mezcla bituminosa, Deformación crítica, Reología, Betún modificado con polímeros (BMP), Reómetro de corte dinámico (DSR), Flexotracción dinámica.*

El fallo por fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas no suele producirse en la mayoría de los ensayos de una forma brusca, fisurándose totalmente el material, lo que permitiría fácilmente determinar el número de ciclos asociados al fallo por fatiga, sino que en la mayoría de los ensayos tiene lugar un progresivo deterioro del material, daño continuo, sin que llegue a producirse la fisuración completa de la probeta. El fallo por fatiga en mezclas bituminosas se determina de dos formas, mediante ensayos realizados a tensión controlada o ensayos a deformación o desplazamiento controlado.

En el caso de tensión controlada, se registra la deformación producida por la probeta al aplicar una tensión o carga constante. La resistencia a fatiga del material se asocia a la rotura o cuando el módulo de la mezcla se reduce en un 10%. En el caso de deformación o desplazamiento controlado, se registra la evolución de la carga durante el ensayo. Se considera que se ha producido el fallo por fatiga cuando la carga o el módulo del material ensayado se reduce a la mitad. Estos mismos tipos de ensayo y de criterios son empleados en la caracterización de ligantes bituminosos frente a la fatiga.

A pesar de la claridad con que se definen los criterios de fallo por fatiga, no resulta sencilla su aplicación en la práctica, debido, sobre todo, a la forma que tienen las curvas donde se recoge la evolución de los parámetros que indican el fallo por fatiga. Estas curvas tienen la forma de S y según varios autores ^(1, 11, 111) en el proceso de fatiga podrían distinguirse tres fases, Figura 1.

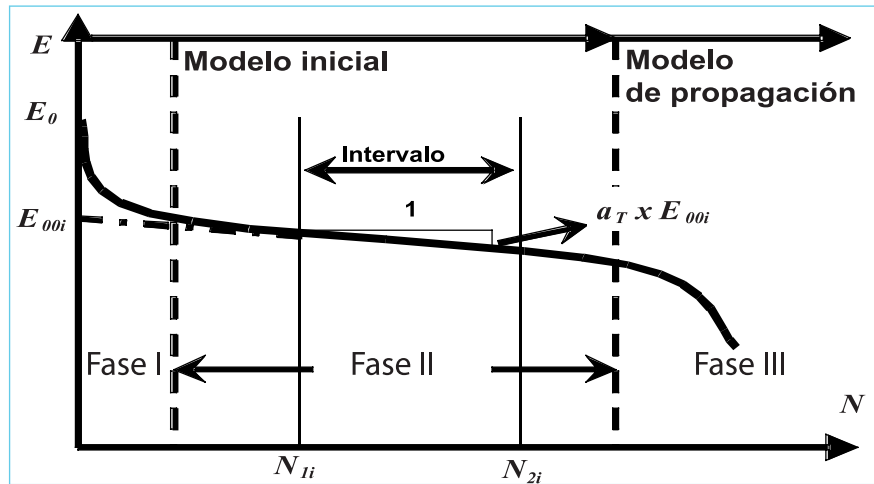


Figura 1. Evolución del módulo de la mezcla bituminosa con los ciclos

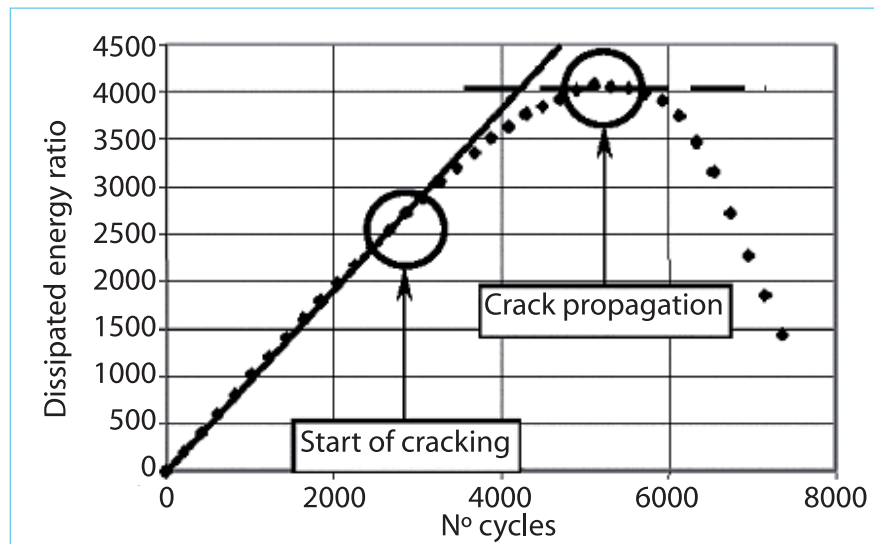


Figura 2. Variación del ratio de energía disipada a tensión controlada

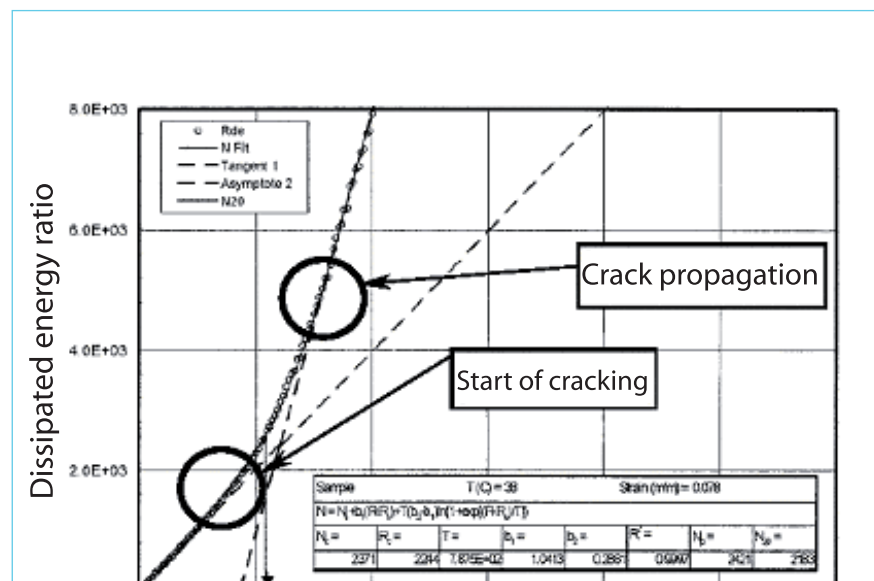


Figura 3. Variación del ratio de energía disipada con deformación controlada

En la primera fase se produce un rápido descenso del módulo de la mezcla, que según Di Benedetto et al.⁽¹⁾, es debido a que se genera un calentamiento de la mezcla por su comportamiento viscoso y esto da lugar a una pérdida de módulo en el que también tiene influencia la tixotropía y fenómenos locales. La segunda fase es la que muestra una pérdida continua del módulo, que según estos autores, es la que realmente se debería asociar con el proceso de fatiga. En esta fase es cuando se van produciendo los pequeños fallos y microfisuras en la mezcla. La tercera fase es donde aumenta la densidad de fallos y se originan las fisuras, creando un decremento rápido del módulo de la mezcla.

Khalid y otros autores^(IV, V) han estudiado el proceso de fatiga de mezclas a partir de la energía que el material va disipando en cada ciclo de carga, determinado a partir del estado de tensiones y deformaciones a que está sometido el material, y como éste se incrementa en el ensayo de tensión controlada cuando se inicia el fallo de la probeta, mientras que disminuye en el ensayo de fatiga a deformación controlada.

En el caso de un ensayo de carga cíclica a tensión o deformación controlada la energía disipada en cada ciclo viene dada por la siguiente expresión:

$$w = \pi \sigma \varepsilon \sin \theta \quad (I)$$

donde:

w = Energía disipada,

σ = Tensión aplicada,

ε = Deformación aplicada, y

θ = Ángulo de desfase.

Este proceso permite obtener de forma más sencilla, sobre todo en el caso del ensayo a tensión controlada, el fallo por fatiga de la probeta. Además, este criterio de fallo corresponde en ambos casos a una situación física de la probeta, momento cuando la densidad de microfisuración es muy alta y empieza a producirse la fisura y rotura rápida de la probeta.

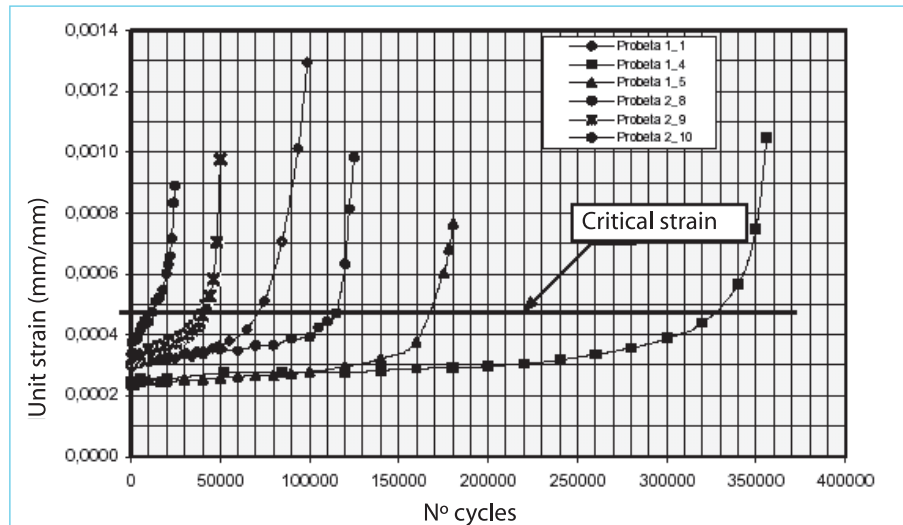


Figura 4. Deformación crítica de una mezcla bituminosa.

Delgadillo y Bahía⁽⁶⁾ aplican también estos conceptos anteriormente enunciados en el estudio a fatiga de ligantes bituminosos. Ambos autores han estudiado la fatiga con ensayos en el reómetro de corte dinámico, mediante el análisis de la energía disipada (ecuación nº 1) y el ratio de energía disipada (ecuación nº 2), determinando que al graficar el ratio de energía disipada con respecto a los ciclos de carga o deformación controlada, se crea una curva que parte del origen con una pendiente constante y que después de varios ciclos se produce una separación, sitio donde se originan las grietas.

Para ensayos a tensión controlada la separación se produce descendientemente, alcanzando un valor máximo, lugar donde se propagan las grietas y se produce el fallo por fatiga, Figura 2. En el ensayo a deformación controlada la separación es ascendente, llegando al sitio de fallo por fatiga cuando la separación alcanza un valor del 20% con respecto a la línea de tendencia, Figura 3. Este criterio es utilizado por Bahía y Delgadillo en la determinación al fallo a fatiga de los betunes.

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \phi_i}{\pi \sigma_n \varepsilon_n \sin \phi_n} \quad (II)$$

donde:

DER = Ratio de energía disipada ciclo i,

σ = Tensión aplicada ciclo i,

ε = Deformación aplicada ciclo i, y

θ = Ángulo de desfase ciclo i.

Pérez y otros ^(VIII, IX, X) han investigado el comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas en ensayos a flexo-tracción en tres puntos con desplazamiento controlado, enfocando especialmente el estudio a la evolución de las deformaciones. De los resultados obtenidos, han demostrado que, sin importar el nivel de desplazamiento impuesto a la mezcla y el material empleado en su fabricación (virgen y reciclado), existe un nivel de deformación en la cual, la deformación aumenta rápidamente y se produce el fallo. Esta deformación ha sido denominada *deformación crítica*, Figura 4. Adicionalmente, se observó que la pendiente de la curva de ley de fatiga es menor en la medida que el módulo del ligante o de la mezcla se incrementa.

Características	Unidad	Norma NLT	Tipo de Betún		
			B13/22	B-60/70	BM-3b
Penetración a 25°C, 100 g	0,1 mm	124/84	17	64	60
Índice de penetración		181/88	0,1	-0,5	2,4
Punto de Reblandecimiento A y B	°C	125/84	67,3	50,6	64,4
Punto de Fragilidad Fraass	°C	182/84	5	-13	-
Densidad	gr/cm ³	122/91	-	1.034	-

Tabla 1. Características de los betunes empleados.

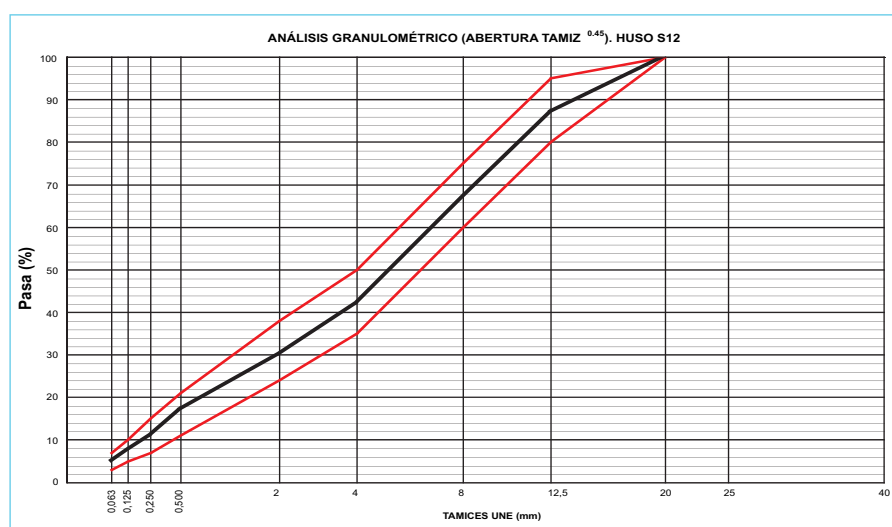


Figura 5. Curva granulométrica de la mezcla S-12

ESTUDIOS REALIZADOS

El estudio realizado ha consistido en determinar el fallo a fatiga de diferentes tipos de betunes, Tabla 1, mediante el empleo del reómetro dinámico de corte (DSR) y el ensayo a fatiga a flexotracción de diferentes mezclas de la misma granulometría, Figura 5, fabricadas con estos ligantes. Dos de estos betunes son convencionales, tipo B13/22 y B60/70, y el tercero es un betún modificado con polímeros (BMP), tipo BM-3b.

1. Ensayos en el reómetro de corte dinámico

Para obtener la ley de fatiga de los betunes estudiados, se realizaron ensayos a tensión controlada entre 1.000 y 9.000 Pa en el reómetro de corte dinámico, donde se midió la evolución de la deformación con los ciclos de carga (ver Foto 1).

Los ensayos en el DSR se realizaron en muestras cilíndricas de 8 mm de diámetro por 2 mm de altura, a una frecuencia de 1,59 Hz y a 20°C, Figura 6. La función de carga cíclica utilizada en los ensayos fue sinusoidal a ten-

sión controlada y el cálculo de la deformación se realizó a partir de la relación entre la altura y el ángulo de giro en la parte superior de la muestra, tal como se observa en la Figura 7.

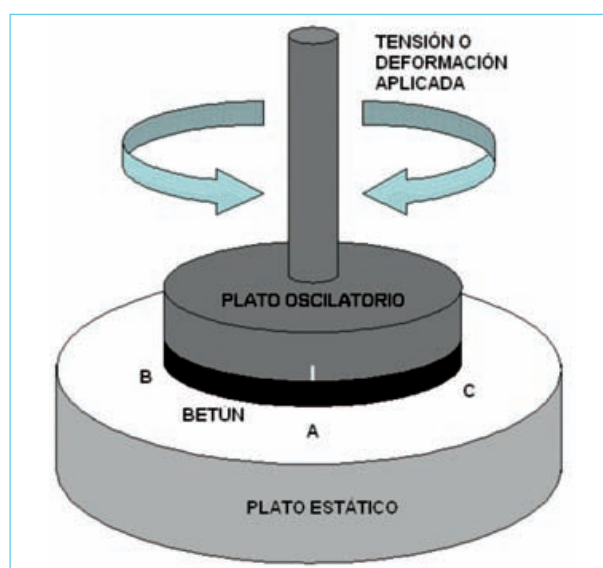


Figura 6. Esquema del ensayo a fatiga de betunes en el reómetro de corte dinámico (DSR)

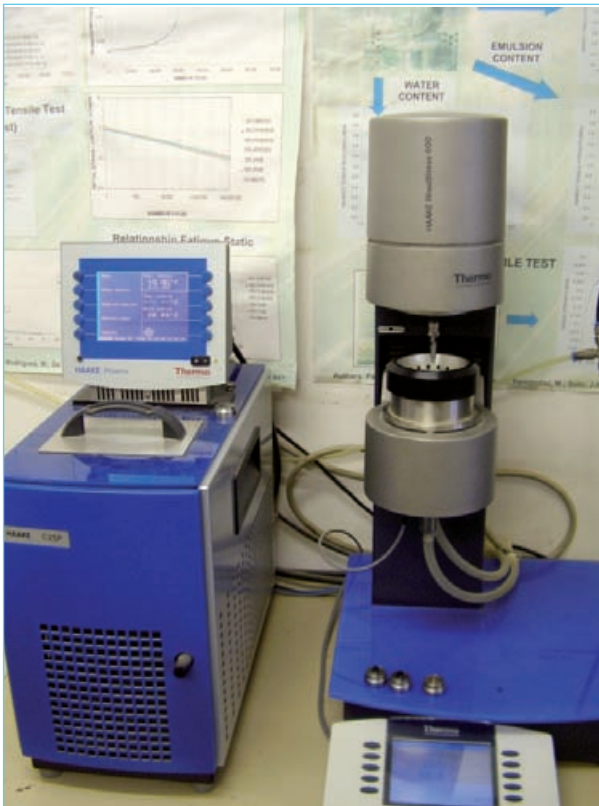


Foto 1. Equipo del reómetro de corte dinámico (DSR).

El criterio de fallo utilizado para determinar la ley de fatiga consistió en calcular el valor máximo del ratio de energía disipada (DER, ecuación nº2), Figura 8, ciclo donde el material presenta la fatiga. La ley de fatiga de los tres betunes estudiados (convencionales, B 13/22, B 60/70 y modificado BM 3-b) se representa en escala logarítmica y en ella se relaciona el número de ciclos de rotura con la deformación inicial, Figura 9.

También se ha obtenido la evolución de la deformación durante la realización del ensayo de los tres betunes, Figuras 10, 11 y 12. En ellas puede observarse como prácticamente todas las muestras rompen a un mismo nivel de deformación, que en el caso del betún modificado está en el rango de 0,15 a 0,20 y en el caso de los betunes convencionales entre 0,08 y 0,12 para el betún B-60/70 y de 0,04 a 0,06 para el betún B-13/22.

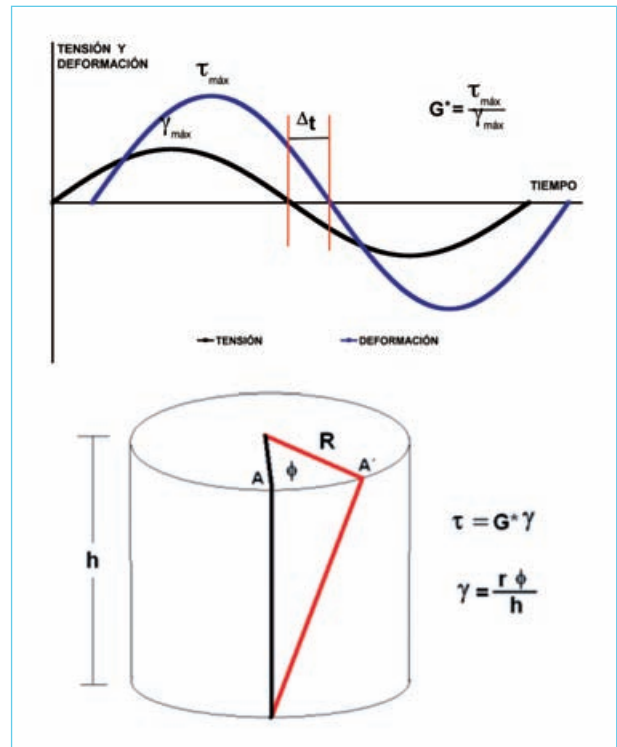


Figura 7. Función de carga y cálculo de la deformación en los ensayos en el DSR

Si ahora se comparan estos resultados con las leyes de fatiga obtenidas, Figura 9, se observa como la ley de fatiga del betún modificado, que se encuentra en la parte superior de la figura, es la que, para una misma deformación inicial, soporta mayor número de aplicaciones de carga, necesitando más número de aplicaciones de carga para llegar a su nivel de deterioro. Por el contrario,

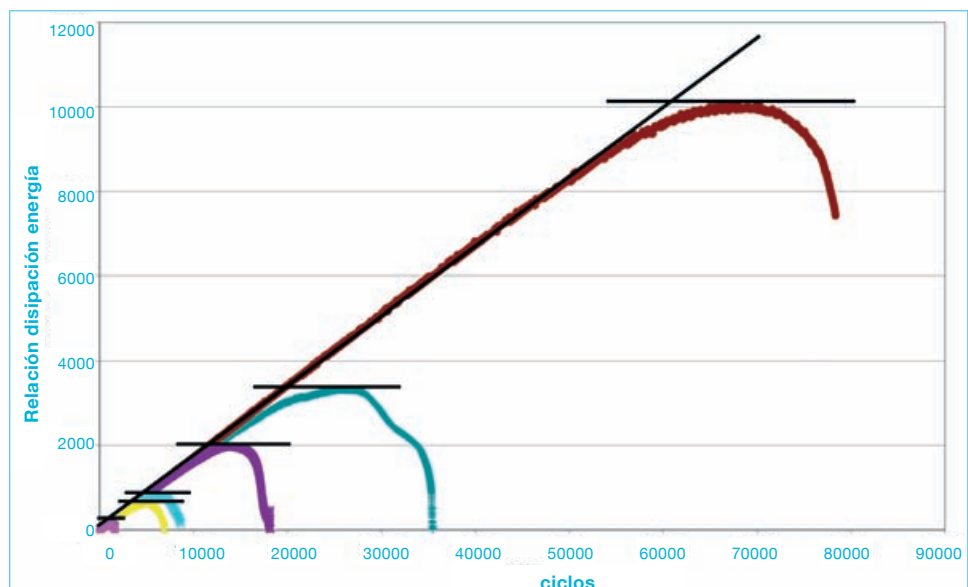


Figura 8. Ciclo de fallo con el cálculo del ratio de energía disipada

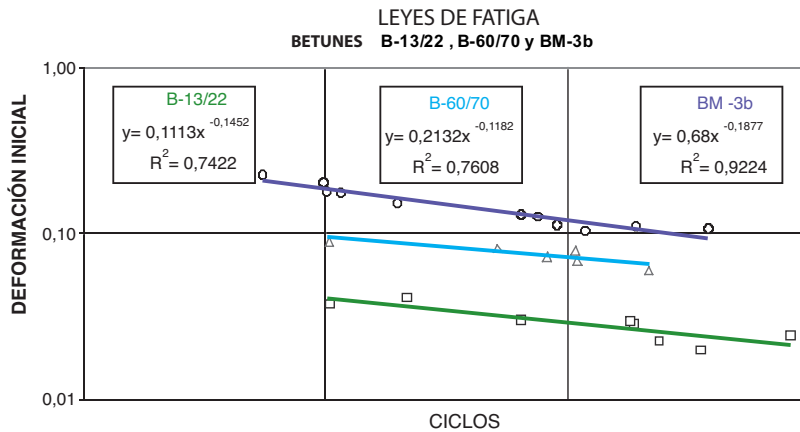


Figura 9. Ley de fatiga de diferentes betunes

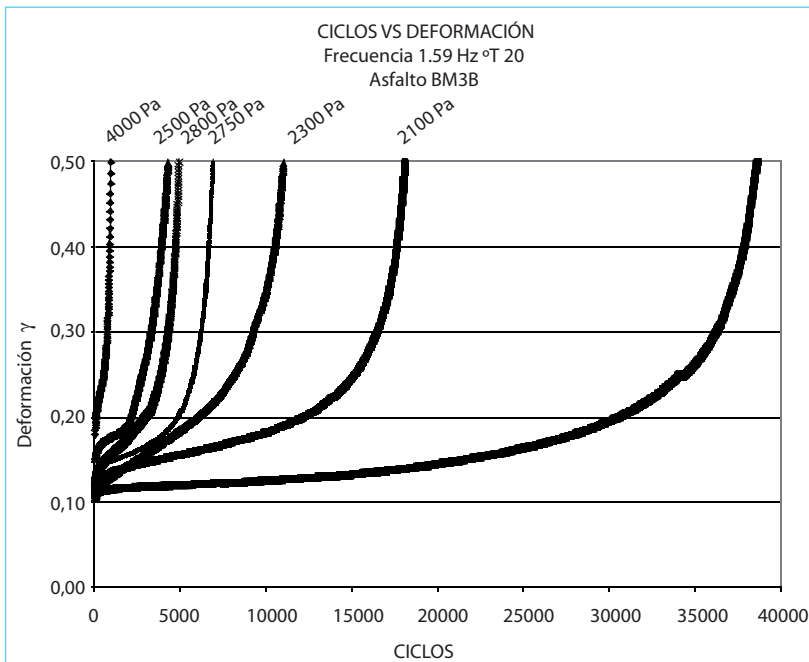


Figura 10. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Betún BM-3b.

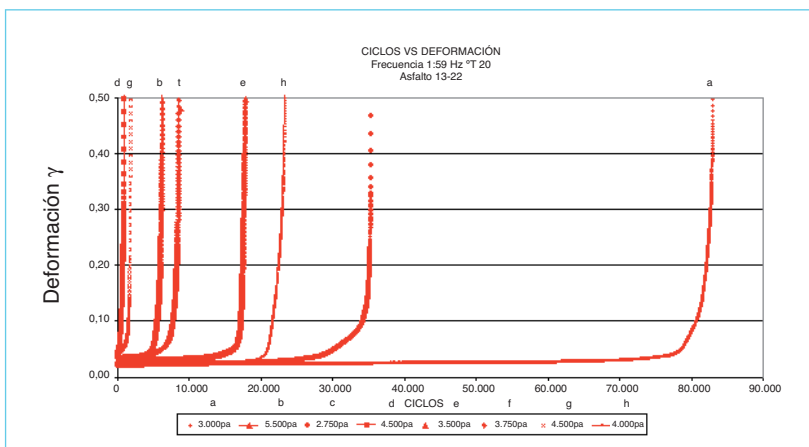


Figura 11. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Betún B-13/22

el betún B-13/22, alcanza su nivel de deformación con muy pocas aplicaciones de carga.

Por otra parte, también es interesante analizar las pendientes de las curvas de evolución de deterioro del betún B-60/70 y B-13/22. En el caso del betún más blando, con un menor módulo de rigidez, la pendiente de estas curvas es mayor y cada aplicación de carga supone un mayor aumento de la deformación. Por el contrario, en el caso del betún B-13/22, con un mayor módulo de rigidez, el incremento de deformación en cada ciclo es mucho menor. Esto lleva a que la pendiente de la ley de fatiga representada en escala logarítmica sea menor (menor valor de b), cuanto mayor sea su módulo.

2. Ensayo en mezclas

Se ha determinado la ley de fatiga, con control de desplazamiento mediante el ensayo a flexotracción dinámica, de acuerdo a la norma española NLT-350/90 (ver Foto 2).

El ensayo consiste en fabricar una muestra prismática y fijarla en sus extremos por el lado mayor. Posteriormente se aplica una carga sinusoidal a desplazamiento controlado en el centro de la probeta y se determina la deformación en el extremo contrario a la aplicación de la carga, Figura 13.

El criterio de fallo por fatiga corresponde cuando el módulo desciende a la mitad del valor inicial, Figura 14. En la Figura 15 se han representado las leyes de fatiga obtenidas para estas tres mezclas.

También se ha obtenido en estos ensayos la evolución de la deformación en la fibra inferior de la probeta que aparece en las Figuras 16 y 17 para el betún B-60/70 y B-13/22, respectivamente. En ellas se puede observar que el fallo por fatiga ocurre al mismo nivel de deformaciones con independencia de la deformación o tensión inicial. La mezcla fabricada con el betún B-60/70

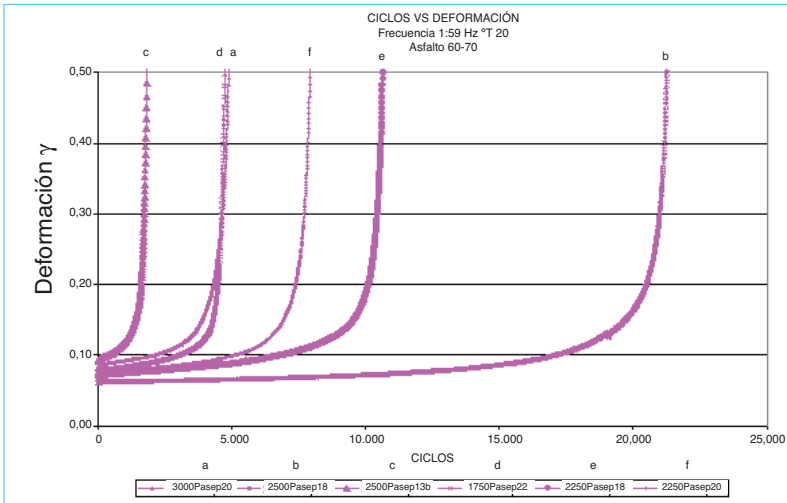


Figura 12. Evolución de la deformación con los ciclos de carga. Betún B-60/70

falla a una deformación unitaria mayor que la fabricada con el betún B-13/22, a 0,0008 y 0,0005 mm/mm respectivamente.

Por otra parte, la mezcla fabricada con el betún modificado rompe a una deformación crítica de alrededor de 0,0012 mm/mm. Esto hace que al obtener las leyes de



Foto 2. Ensayo de flexotracción dinámica con 3 puntos de apoyo

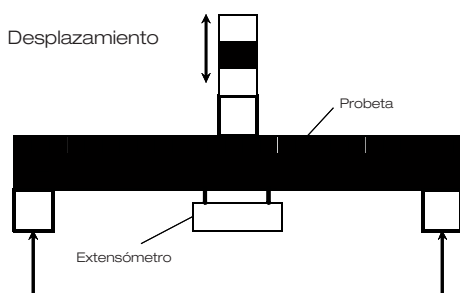


Figura 13. Esquema del ensayo de flexotracción dinámica en tres puntos de apoyo

fatiga, Figura 15, la mezcla fabricada con el betún modificado se encuentre en la parte superior de la figura, mientras que la mezcla fabricada con el betún B-13/22 se sitúe en la parte inferior. Es decir, se colocan en el mismo orden que las de los betunes.

CONCLUSIONES

El estudio muestra, tal como se ha indicado en la presentación del trabajo, el efecto tan importante que tiene el módulo y la deformación crítica en el fallo por fatiga de ligantes y mezclas bituminosas. En el caso de los ligantes con el mismo módulo, su comportamiento a fatiga es tanto mejor cuanto mayor sea su deformación crítica.

Se observa también la dependencia que existe entre el comportamiento a fatiga de la mezcla y el betún empleado en su fabricación. A pesar de su bajo contenido en la mezcla, 4,5% en peso, el efecto del tipo de ligante empleado es muy significativo en su respuesta.

Esta deformación crítica ha sido mostrada en otros estudios y está relacionada con la ductilidad del ligante, de forma que cuando más dúctil sea el ligante, para el mismo módulo, mejor será su comportamiento a fatiga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Di Benedetto, H.; de La Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, H.; Lundström, R. "Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution", 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2003, p.15-38.

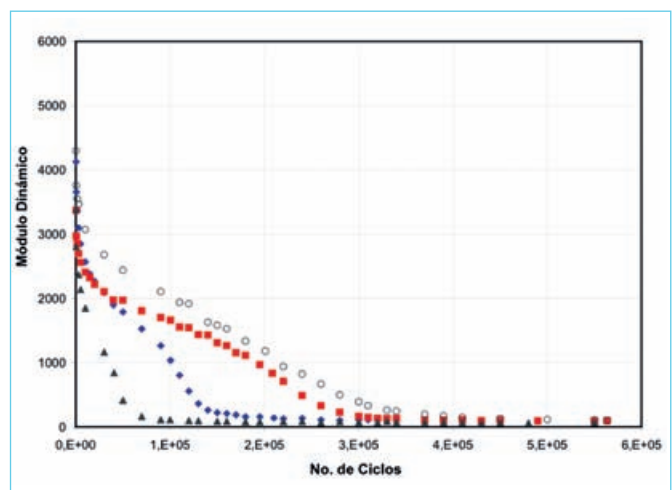


Figura 14. Evolución del módulo con los ciclos. Betún B-60/70

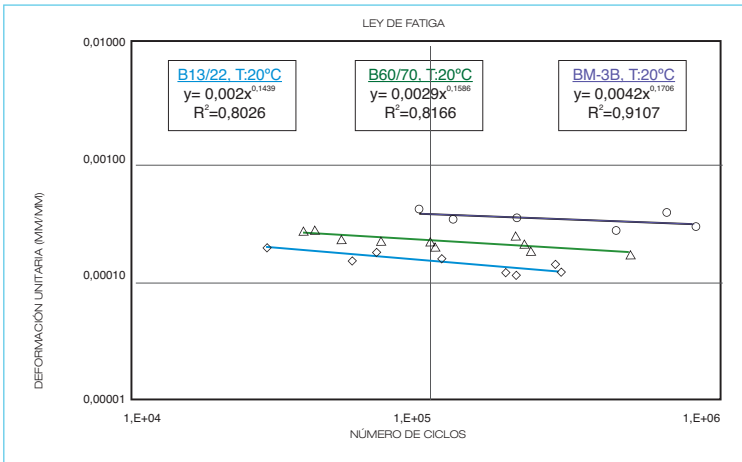


Figura 15. Leyes de fatiga en mezclas bituminosas

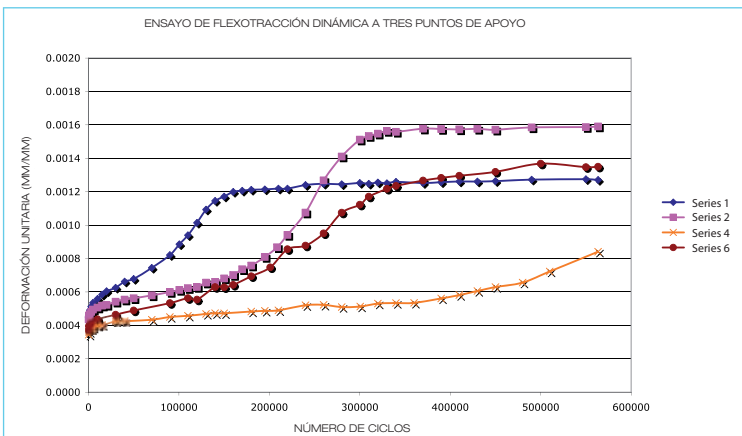


Figura 16. Evolución de la deformación con los ciclos para la mezcla con betún B-60/70

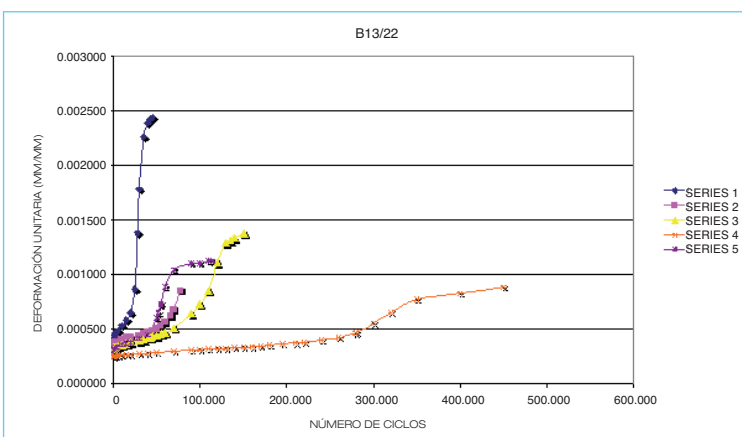


Figura 17. Evolución de la deformación con los ciclos para la mezcla con betún B-13/22

II. Planche, J.P.; Anderson, D.; Gauthier, G.; Le Hir, Y; Martin, D. "Evaluation of fatigue properties of bituminous binders". 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2003, p.110-116.

III. Roque, R.; Lytton, R.; Uzan, J.; Fernando, E.; Hiltunen, D.; Stoffels, S. "Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes", Strategic Highway Research Program. SHRP-A-357, 1993, National Research Council.

IV. Khalid, H.; Artamendi, I. "Characterization of fatigue damage for paving asphaltic materials". Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Blackwell Publishing Inc., Sheffield, UK, No. 28, 2005, p. 1113-1118.

V. Khalid, A. G. Carpenter, Samuel H. "Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach" Canadian Journal Civil engineering. N.33. 2006. p.890-901.

VI. Delgadillo, R.; Bahia, H. "Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis". Association of Asphalt Paving Technologists. March 7-9. 2005.

VII. Normativa española. NLT 350/90. "Ensayo a flexotracción dinámica en tres puntos de apoyo". 1990.

VIII. Pérez, F.; Miro, R.; Martínez, A.; Alonso, J.; Cepeda, J.; Rodríguez, M. "Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo a tracción". Premio Internacional a la Innovación en Carreteras. Premio Juan Antonio Fernández del Campo. Asociación Española de la Carretera. Madrid. 2006.

IX. Pérez, F.; Miro, R.; Martínez, A. "Analysis of the fatigue process in bituminous mixes. Fatigue critical strain". Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Washington, EEUU, 21-25 de Enero de 2007.

X. Pérez, F.; Miro, R.; Martínez, A. "Relación entre la respuesta mecánica de las mezclas bituminosas a tracción directa y su comportamiento a fatiga". XIV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. La Habana, Cuba, 18-23 de Noviembre de 2007.

Túneles con tuneladoras. Las mayores tuneladoras del mundo (I)



Álvaro FERNÁNDEZ COTA

*Gerente de la U.T.E. By-Pass Sur de la M-30. Túnel Sur.
DRAGADOS S.A.*

Enrique FERNÁNDEZ

*Director de Obras Subterráneas.
Dirección Técnica de DRAGADOS S.A.*

RESUMEN

Las dos obras del By-Pass Sur de la M-30 crearon, mediante dos túneles de 15 m de diámetro excavados con tuneladora, un desvío que descongestionó el entorno sur de ésta vía al separar el tráfico de la misma que era ajeno a los enlaces del Nudo Sur.

Este artículo describe las características y ejecución del Túnel sur y de la tuneladora Tizona, que fue junto con su compañera Dulcinea la tuneladora más grande del mundo en esos días. Es de resaltar que la excavación del Túnel Sur, de 3.660 m, se realizó en tan sólo 200 días (11 Abril de 2006/ 27 Octubre de 2006) con unos rendimientos puntuales (46 m/día) y medios (557 m/mes) excepcionales para una máquina de ese diámetro, y todo ello con unas condiciones difíciles de arranque, de cruce bajo edificios y logísticas.

Palabras clave: Túnel, Tuneladora, M-30, Dovelas, By Pass Sur, Corona de excavación.

El anillo interior de circunvalación de Madrid, llamado M-30, abarca una superficie de 42 km² y en su interior reside un millón de habitantes aproximadamente. Fue construido a lo largo de diferentes fases entre los años 60 y 80. Los criterios seguidos en estas diversas fases no fueron siempre homogéneos, dándose casos de zonas reguladas con semáforos frente a otras con características de autopista. La presencia de nudos complicados, no siempre evidentes, y cambios continuos en el número de carriles de las calzadas principales han supuesto a lo largo de las últimas décadas la profusión de accidentes de tráfico, así como tremendas aglomeraciones en horas punta. Otra consecuencia no menos desdeñable ha sido el enorme impacto ambiental y polución acústica causada en zonas residenciales de la capital.

El alcalde de Madrid tomó la decisión, al inicio de la legislatura 2003–2007 y basándose en criterios socio económicos y medioambientales, de reconstruir la M-30 siguiendo los principios de desarrollo sostenible que se enumeran a continuación:

- Convertir en subterránea gran parte del nuevo anillo así como sus enlaces, a fin de restituir nuevas zonas verdes que permitan disminuir el impacto ambiental,
- Aumentar la capacidad del tráfico rodado, mejorando la fluidez del mismo,
- Aumentar la seguridad del tráfico mediante paneles informativos claramente visibles y evitando los maniobras peligrosas, y
- Rediseñar los enlaces con las 6 radiales así como con otras salidas y entradas a la ciudad.

El proyecto total de remodelación asciende a 3,7 billones de euros. A su finalización, mediados del 2007, se espera poder ahorrar 14 millones de horas en desplazamientos, lo que representa un ahorro anual de 4,5 millones de euros en consumo de combustible. No menos importante será la reducción, en términos de contaminación, de 35.000 toneladas anuales de emisiones de CO₂ y una previsión

de 400 accidentes menos cada año en este anillo de circunvalación. Del mismo modo se prevé que estos valores se incrementen en los años sucesivos.

La zona oeste de Madrid por donde transcurre el cauce del río Manzanares paralelo a la M-30 es la más beneficiada por esta transformación, ya que en ella se restituyen las antiguas praderas de San Isidro y se eliminan las barreras que suponían los trazados actuales.

SECCIÓN TIPO DE LOS TÚNELES DEL BY-PASS SUR

Uno de los mayores retos de esta remodelación no se refiere al propio anillo de circunvalación sino a su conexión con la A-3, autovía de Levante. Este enlace es el más congestionado en la actualidad y uno de los que soporta una mayor densidad de tráfico en España con más de 250.000 vehículos diarios. Su remodelación es el principal objetivo del By-pass Sur, que se trata específicamente en otro de los artículos de este número especial de la revista *Carreteras*.

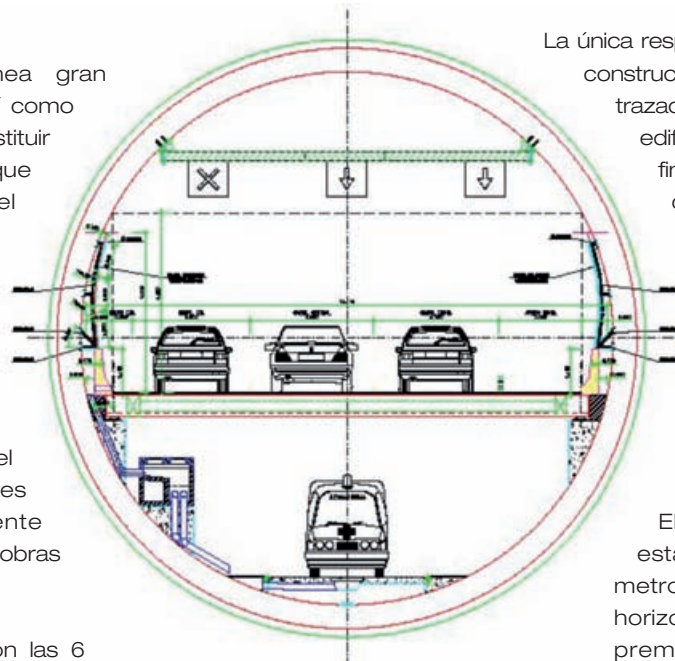


Figura 1. Sección tipo del túnel.

La única respuesta a este problema es la construcción de un túnel ya que su trazado transcurre en parte bajo edificios residenciales. La solución final adoptada ha sido la de construir túneles bitubo, con un tubo para cada sentido de tráfico, capaces de albergar tanto tráfico ligero como pesado. Las calzadas tienen 3,5 m de ancho, los arcones 0,5 m y las aceras 0,8 m (ver Figura 1).

El gálibo libre es de 4,5 m estando la calzada ubicada un metro por debajo del diámetro horizontal del túnel. Con estas premisas ha sido necesario diseñar túneles de 13,45 m de diámetro interior. Debido a la forma circular de los mismos, es

posible albergar asimismo dos carriles de emergencia en su parte inferior (5,5 x 4 m).

La longitud total de cada tubo es de 3.660 m y se conectan entre sí mediante 8 galerías de conexión de las que tres son para vehículos y el resto exclusivamente para personas (Figura 2). Cada tubo dispone de su

propio pozo de ventilación situado en el tercio central del trazado. La protección contra el fuego de estos túneles urbanos se ha resuelto mediante la incorporación de fibras de polipropileno en el revestimiento de hormigón.

La cobertura máxima de los túneles es de 65 m siendo la media de 30 m, o lo que es lo mismo, de 2 diámetros. Los portales de ataque, situados uno a cada extremo del trazado, se han diseñado mediante pozos rectangulares con un recubrimiento inferior a 15 m a fin de reducir su altura. Ello ha obligado a realizar tratamientos de mejora del terreno en ambos inicios y a lo largo de los primeros metros de túnel.

MÉTODO DE EXCAVACIÓN SELECCIONADO

1. Método de excavación

Como se ha indicado anteriormente, se ha transferido parte del nuevo trazado de la *Calle 30* al subsuelo. Para ello se han empleado diversos sistemas o técnicas de excavación, desde el *método de Madrid*, pasando por el *falso túnel* y por supuesto el empleo de las *tuneladoras*.

El método del *falso túnel*, pantallas y losa, es el más económico teniendo en cuenta el terreno de Madrid. No obstante presenta una serie de inconvenientes como son la reubicación de servicios afectados en zonas densamente pobladas, un mayor volumen de excavación y consiguientemente de transporte a vertedero, cada vez más escasos en las proximidades de la capital y que por tanto lo hace menos interesante que la opción del túnel en mina. Esta última opción permite además el mantener los trazados bajo edificaciones o monumentos históricos.

El *método de Madrid* es un método de excavación en túnel de forma artesanal y es empleado en la capital con éxito para pequeños túneles, cavernas y galerías. Se basa en una excavación por fases y se adapta perfectamente a variaciones en geometría de las estructuras excavadas.

En lo que se refiere a los túneles del By pass Sur, al tener un diámetro de excavación de 15 m, no era factible pensar en su ejecución en modo abierto teniendo en cuenta además el plazo tan restrictivo de que se disponía para su ejecución.

Los terrenos de Madrid se adaptan perfectamente para su excavación mediante el empleo de *tuneladoras* del tipo EPB (*“Earth Pressure Balance”* equilibrio de presión de tierras) tal y como ya se había confirmado en las experiencias obtenidas en los trabajos realizados en el Metro de Madrid a lo largo de los últimos años.

Por ello, en julio del 2004 se encargó la construcción de dos tuneladoras del tipo EPB de 15 m de diámetro que resultaron ser las mayores del mundo.

La geología de Madrid y más específicamente de la zona donde se desarrolló el proyecto de los túneles del by pass Sur presenta las siguientes características:

- Depósitos aluviales hasta 20 m de profundidad,
- Arcillas arenosas (Peñuela) con espesores de 20 a 30 m, y
- Arcilla con niveles de yeso (Peñuela yesífera) con espesores de 20 a 25 m.

En cuanto a los parámetros geotécnicos, la Peñuela presenta una cohesión de $\tau = 60$ kPa, un ángulo de fricción interno de $\phi' = 28^\circ$ y un módulo de deformación de $E = 220$ MPa. El contenido en finos que atraviesa el tamiz 200 alcanza el 85-95%. Los túneles se construyeron bajo el nivel freático y con una carga hidrostática máxima de 40 m.

El revestimiento está conformado por 9 dovelas de 60 cm de espesor y 2 metros de ancho configurando un anillo del tipo universal. Las dovelas van atornilladas entre sí mediante 3 bulones y con el anillo contiguo mediante 4 bulones, cada dovela. A fin de posicionar correctamente las dovelas, se colocan dos biconos por dovela en la unión de cada anillo.

La dovela de mayor longitud, 4,76 m en su lado exterior, pesa 13,1 t siendo el peso del anillo completo de

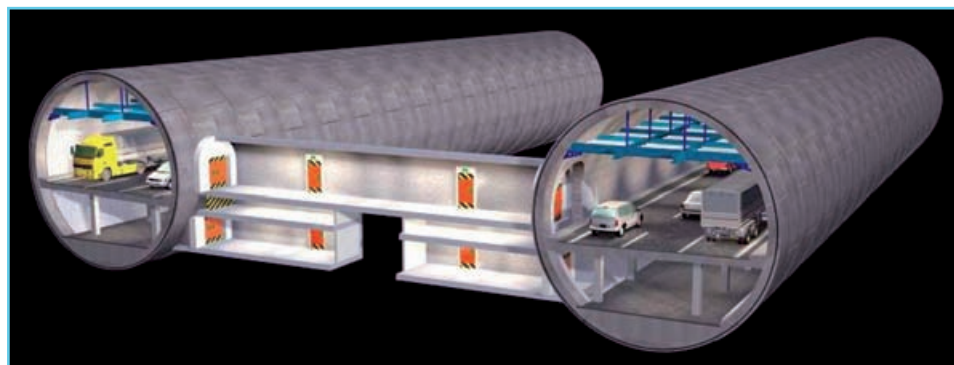


Figura 2. Vista 3D de los túneles y galerías de conexión.

125 toneladas. Por último cabe reseñar que el anillo se complementa con una pieza de hormigón en solera (postizo) sobre la que se instala las vías provisionales de trabajo.

2. Experiencias previas del Metro de Madrid

La experiencia con tuneladoras del tipo EPB comenzó en 1995, cuando se empleó una máquina LOVAT de 7,38 m de diámetro (DRAGADOS) para realizar la ampliación de la Línea 4 y que incluía el paso bajo el río Manzanares con tan solo 2 m de cobertura. Desde entonces y a lo largo de las sucesivas ampliaciones 1995-1999, 1999-2003 y 2003-2007 se han realizado más de 140 km de túneles por este procedimiento, alcanzándose un rendimiento medio superior a los 600 m/mes y un record de 1.230 m en un mes de trabajo.

Como resultado de esta experiencia a lo largo de la última década, se ha alcanzado un alto grado de conocimiento en este tipo de excavaciones. El análisis de los resultados obtenidos, y principalmente de los tiempos improductivos, permitió diseñar estas nuevas máquinas de modo a conseguir una mayor eficiencia de las mismas.

Es de sobra conocido que este tipo de máquinas emplean el 50% del tiempo útil en la excavación y colocación de anillo de revestimiento, mientras que el otro 50% aproximadamente se emplea en reparación de averías, cambio de herramientas de corte, extensión de tuberías y cableado, topografía, tratamientos del terreno desde la propia máquina, etc.

También y no menos importante, es el elevado número de descarrilamientos de los convoyes que circulan entre el portal de ataque y la tuneladora suministrando las dovelas y retirando el escombros de la excavación.

La experiencia nos demuestra que el cambio de herramientas es aun la asignatura pendiente, a pesar de los últimos avances que permiten su cambio desde el interior de la cabeza de corte sin necesidad de exponer a los trabajadores a los riesgos de desprendimiento. Las estrecheces de la cámara, andamios provisionales, tornillos difíciles de retirar, etc. hacen esta operación lenta y penosa.

Las averías de las tuneladoras están directamente relacionadas, en la mayoría de los casos, con el

funcionamiento al máximo de sus capacidades electromecánicas. Por tanto, unas especificaciones técnicas más elevadas de lo estrictamente necesario nos permitirán trabajar de una manera más holgada e incrementar las producciones. Esta solución es aplicable asimismo a todos los equipos instalados en el "back up"^(a) tales como las bombas de aditivos, de mortero, ventilación, desagües y demás equipos auxiliares.

La tercera causa de pérdida de rendimiento por paradas se refiere a los numerosos descarrilamientos de los convoyes, como se ha indicado anteriormente. La tendencia actual recomienda el empleo de cintas transportadoras para el desescombro de las tierras ya que de este modo la composición de los convoyes se limita al transporte de dovelas, material de inyección (mortero o gravilla) y materiales varios. Así el riesgo de salida de las vías se minimiza notablemente.

Dado que, en el caso de los túneles del By pass Sur no se esperaban condiciones geológicas adversas y las máquinas fueron diseñadas para trabajar en modo EPB, las mejoras y el estudio detallado de las tres causas fundamentales de pérdidas de tiempo arriba mencionadas han permitido aumentar considerablemente la producción y reducir las paradas durante la operación.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS TUNELADORAS

Las especificaciones técnicas exigidas a los fabricantes de las tuneladoras se basaron en aquellas solicitadas para las máquinas del Metro de Madrid, con geología muy similar, extrapoladas a su mayor diámetro e incrementadas en la reserva necesaria para evitar las averías y aumentar los rendimientos.

1. Diámetro de excavación

El diámetro de excavación está condicionado por el diámetro libre interior antes mencionado. Si añadimos a los 13,45 m de diámetro libre el espesor de las dovelas obtenemos 14,65 m como diámetro exterior. Por consiguiente, considerando el espesor del "gap"^(b) definido de modo que se reduce el riesgo de atrapamiento de la máquina y permite tomar curvas de 350 m a la misma, obtenemos un diámetro de excavación superior a los 15 m. La exigencia del radio mínimo fue definida a fin de corregir posibles errores de guiado ya que el trazado limita el radio mínimo a 500 m.

(a) Tren de carretones que arrastra la tuneladora y en el que se sitúan las instalaciones necesarias para su funcionamiento. En el caso de Tizona son 8 remolques de 2-3 pisos y 134 m de longitud total.

(b) Sobreexcavación que hace la rueda de corte sobre el diámetro exterior de la tuneladora, y que permite a ésta el deslizamiento y pequeños cabeceos para poder describir las curvas del trazado. Tiene influencia en los asientos que puede producir una tuneladora.

Cada fabricante propuso su propio diseño lo que motivó diámetros de excavación diferentes. Mientras que Herrenknecht, con un diseño de escudo de cola tipo sandwich alcanzó los 15,08 m, la máquina japonesa de Mitsubishi con 15,01 m cumplía con los requisitos solicitados.

2. Empuje máximo

El empuje se consigue mediante el conjunto de cilindros hidráulicos que reaccionan contra el último anillo de dovelas instalado. Debe de ser capaz de cumplir los siguientes objetivos (Figura 3):

- Evitar la deformación horizontal en el frente de excavación,
- Compensar la presión efectiva horizontal del terreno,

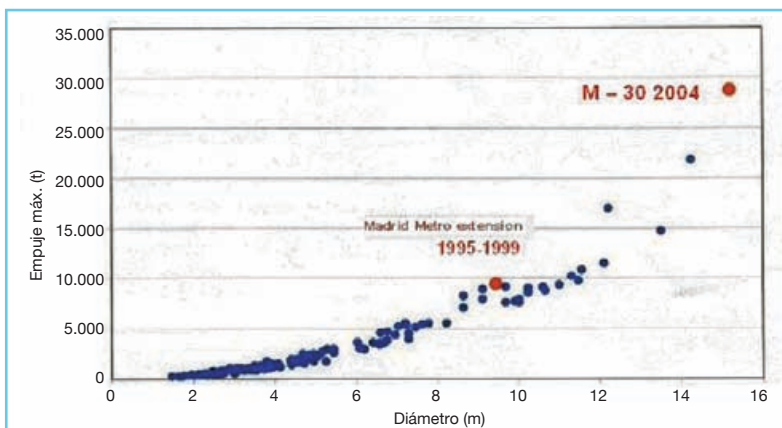


Figura 3. Máximo empuje vs. Diámetro.

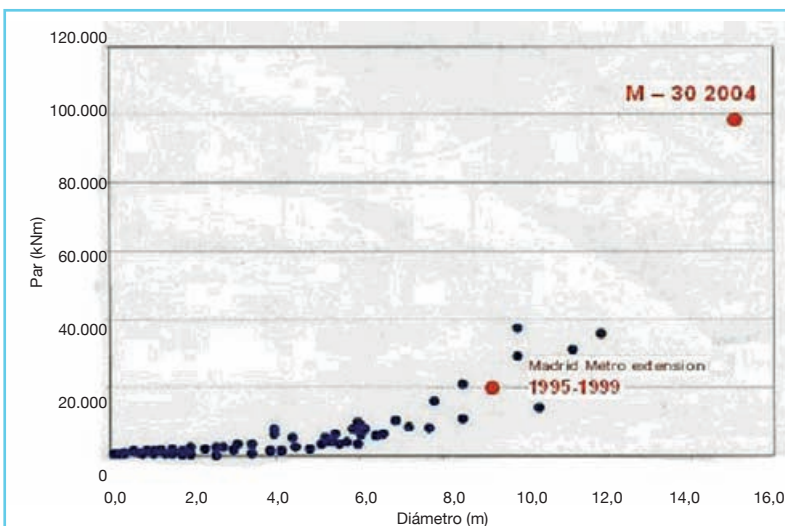


Figura 4. Par vs. Diámetro.

- Compensar la presión del agua intersticial en el terreno,
- Eliminar los asientos verticales del terreno por delante del frente de excavación, y
- Superar el rozamiento de los escudos durante el avance de la máquina.

Las tuneladoras empleadas en la extensión del Metro disponían de un empuje máximo de 100.000 kN con 9,4 m de diámetro de excavación. Considerando que la relación de áreas es de 2,5, se solicitó de los fabricantes un empuje máximo por encima de los 250.000 kN teniendo en cuenta que además alguna vez se plantearon problemas debido a un excesivo rozamiento en los escudos de las máquinas.

Por ello, la tuneladora de Mitsubishi presenta un empuje máximo de 285.000 kN proporcionado por 57 cilindros de 500 t cada uno. Del mismo modo, Herrenknecht dispone de 276.390 kN de empuje máximo para lo que emplea 57 cilindros de 485 t por unidad.

3. Par máximo

El par máximo fue estimado por el Metro de acuerdo con la fórmula:

$$T = (2/3) \pi \tau R^3$$

donde τ es la cohesión del terreno (100 kPa ó 10 T/m²) lo que supone 2175 mT si bien finalmente se exigió 2.000 mT (Figura 4).

Para fijar las exigencias mínimas para las máquinas de la M-30, se utilizó la relación de volúmenes a excavar:

$$T=2.000 (15,1/9,4)^3 = 8.240 \text{ mT}$$

Con este par se consigue:

- Excavar el terreno mediante el empleo de picas y otras herramientas de corte,
- Superar el rozamiento entre el terreno y la cabeza de corte,
- Superar los esfuerzos radiales y tangenciales del rodamiento principal,

- Superar el rozamiento de los anillos de sellado, y
- Homogeneizar las tierras dentro de la cámara.

4. Otras especificaciones

De acuerdo con las características geológicas del terreno previsto en este proyecto se solicitó de los fabricantes una serie de requisitos que se detallan a continuación:

- Presión de trabajo en la parte inferior de la cámara de 6 bar.
- Porcentaje de apertura de la cabeza superior a 30%.
- Más de 6 sensores de presión en la cámara a fin de controlar adecuadamente el proceso de excavación.
- 65 mm/min de penetración o lo que es lo mismo un anillo de 2 m cada media hora.
- Tamaño máximo a pasar por el tornillo de desescombro de 700 x 300 x 300 mm.
- Capacidad de bombeo de espumas para tratamientos del terreno superior a los 1000 m³/h.
- Caudal de bombeo de mortero para inyección del "gap" superior a 50 m³/h.
- Mas de 3 filas de cepillos a fin de evitar entradas de agua.
- Contenedor de rescate con capacidad para 20 personas y 12 horas de supervivencia.

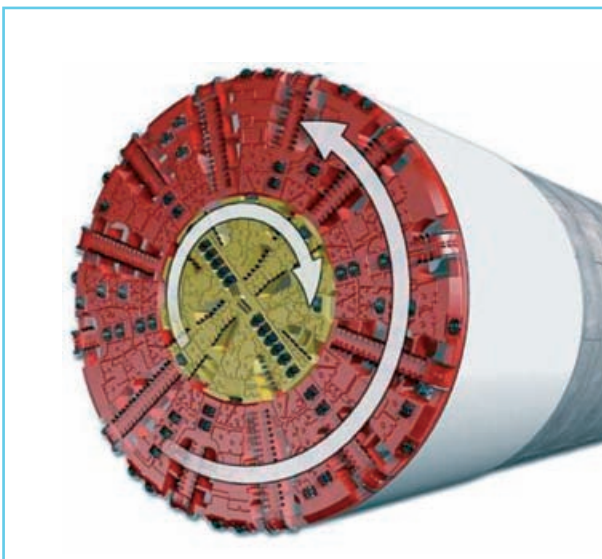


Figura 5. Sentidos de giro inversos en las cabezas de corte.

DOBLE DISEÑO

El proyecto del By pass Sur se dividió en dos contratos independientes adjudicando cada UTE la construcción de su tuneladora, una a Herrenknecht y la otra a Mitsubishi-Duro Felguera. Dado que se trataba de máquinas de nuevo diseño y con el objeto de cumplir con las estrictas especificaciones del cliente así como con un plazo de obra muy limitado, se plantearon soluciones novedosas por parte de ambos fabricantes.

La elevada velocidad de excavación, consecuencia de las exigencias de par y empuje antes comentadas, conjuntamente con revolucionarios diseños en las cabezas de corte y nuevos conceptos aplicados para reducir el tiempo de instalación de los anillos permitieron cumplir con el plazo previsto.

Las propuestas de ambos fabricantes han abierto, en nuestra opinión, las puertas a futuros desarrollos de grandes tuneladoras capaces de realizar la excavación de grandes túneles con rapidez y seguridad.

1. Diseño alemán

El diseño alemán se basa en la forma de evitar la contrarrotación de la máquina motivada por el enorme par aplicado en la cabeza de corte que se enfrenta a la excavación de 181,5 m² de frente.

El modo propuesto para evitar este efecto ha sido el de dividir la cabeza de corte en dos coronas concéntricas que giran en sentidos opuestos durante la excavación. De este modo el par generado por la corona exterior se ve parcialmente compensado por el par opuesto de la corona interior y por consiguiente el riesgo de giro de la tuneladora ante un bloqueo de la cabeza queda drásticamente reducido (ver Figura 5).

El diámetro de la corona interior es de 7 m, con 38,5 m², dispone de 6 radios provistos de picas y cortadores de disco y puede avanzar independientemente del resto de la cabeza posibilitando la excavación de la parte central de forma anticipada y a modo de gran cuele que facilite la excavación del resto de la sección con la corona exterior.

La corona exterior, con 143 m², dispone de 12 radios todos ellos provistos asimismo de útiles de corte. En total tiene 57 cortadores dobles de 17", 332 picas, 24 rascadores y una nariz central, siendo el porcentaje de apertura de la cabeza de corte del 31,6%.

El concepto de doble cabeza había sido empleado anteriormente por Herrenknecht en otras máquinas del tipo hidroescudo, siendo esta la primera vez que el concepto se empleaba en una máquina del tipo EPB. Cabe reseñar que la corona interior tiene una velocidad de rotación mayor que la de la exterior a fin de evitar el riesgo de endurecimiento y atasco del material de excavación en la parte central de la cámara. Debido éste a la baja velocidad de rotación de esta zona conjuntamente con la evaporación del agua motivada por las elevadas temperaturas generadas por la fricción y la motorización.

La cabeza de corte posee motorización hidráulica, con 10 motores en su corona interior y doble engranaje en su corona exterior con 24 y 32 motores respectivamente. Teniendo en cuenta la pérdida de rendimiento de las transmisiones hidráulicas, cercano al 32%, los 15,8 MW instalados proporcionan 10.700 kW a la cabeza de corte.

Con esta potencia se consiguen un par de 9.600 mT a 0,81 r.p.m. en la corona exterior y 8.450 mT a 1,5 r.p.m. en la interior. El par excepcional es de 12.527 mT y 10.890 mT respectivamente.

La longitud del escudo es de 11,51 m, sin articulación. Dispone de tres filas de cepillos en cola y el desescombro se realiza por medio de tres tornillos sin fin. El primero de ellos, de 700 mm se encarga del desescombro de la zona central en tanto que los dos tornillos de 1200 mm retiran el material de excavación desde la parte inferior de la cámara. En cuanto al erector de dovelas es de diseño estándar y provisto de mesa de vacío.

2. Diseño japonés

El diseño japonés es sustancialmente diferente del alemán. Su cabeza de corte es de una sola pieza y está

provista de 44 cortadores triples de disco de 17", 678 picas de diferentes formatos y una nariz central, siendo el porcentaje de apertura de la cabeza de corte del 43%, significativamente mayor que la de Herrenknecht (ver Foto 1).

La motorización de esta tuneladora es eléctrica de frecuencia variable, mediante 28 motores de 358 kW, o lo que es lo mismo 10 MW. Dado que este tipo de motorización tiene menos pérdidas en la transmisión de su cadena cinemática, el par nominal transmitido a la cabeza de corte es de 8.570 mT a 1,05 r.p.m. siendo su par excepcional de 12.700 mT.

El modo de evitar la contrarrotación se consigue mediante la orientación de los cilindros de empuje conjuntamente con la disposición de perfiles metálicos a modo de guías ubicados en la parte inferior del escudo. Adicionalmente y durante la excavación se invierte el sentido de giro de



Foto 1. EPB Mitsubishi - DF.

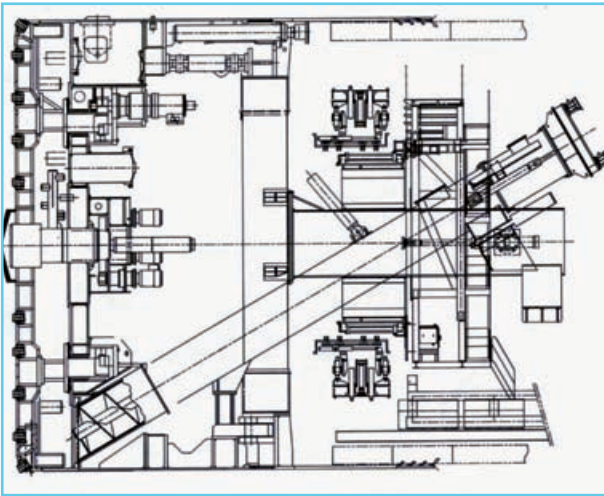


Figura 6. Corte longitudinal EPB Mitsubishi.

la cabeza repetidamente a fin de reducir el riesgo de rotación de la máquina.

Dado que la velocidad de rotación de este tipo de máquinas es muy bajo, en torno a 1 r.p.m., existe un riesgo de bloqueo en la zona central de la cámara con los materiales de la excavación tal y como se indicó anteriormente. La solución propuesta por Mitsubishi a este problema ha sido la de instalar un agitador central formado por tres brazos y con un diámetro de 5 m que, accionado hidráulicamente permite remover el material situado en el centro de la cámara y evitar de este modo su apelmazamiento. La velocidad de rotación es de 2 r.p.m., suficiente para cumplir con este cometido.

La longitud del escudo es de 12,22 m y posee articulación activa. Dispone de cuatro filas de cepillos en el escudo de cola y el desescombro se efectúa mediante un único tornillo sinfín de 1500 mm (Figura 6).

Otra innovación importante de esta máquina es el doble erector de dovelas. Éste ha sido construido con dos mesas de vacío dispuestas en ambos extremos del brazo del erector de manera que la mesa más próxima al alimentador sea la que tome la dovela

para su colocación en el anillo de revestimiento. De este modo se reduce el ciclo de montaje de anillos en el tiempo necesario para desplazarse el erector desde la última pieza colocada hasta el alimentador.

PLANIFICACIÓN DE LOS TRABAJOS

El plazo total de las obras era de 33 meses a partir de julio de 2004, habiendo sido adjudicados contratos independientes para cada uno de los tubos. Previamente se adjudicó a los fabricantes un contrato de 6 meses para preparar el diseño de las máquinas y confirmar la viabilidad de las exigencias del cliente ya mencionadas (ver Foto 2).

Las tuneladoras se fabricaron en un plazo de 12 meses en el caso de Herrenknecht y de 17 meses en el de Mitsubishi. Durante este tiempo se construyeron los dos pozos de ataque, de 40 x 100 m y 30 m de profundidad, situados en ambos extremos del trazado. La idea era la de separar las actividades de cada una de las UTE a fin de evitar las posibles interferencias generadas por las labores en simultáneo desde un único pozo de ataque compartido.

Las previsiones fijaban un rendimiento de excavación de 12 m/día, o lo que es lo mismo de 360 m/mes, lo que suponía el excavar cada uno de los tubos en el plazo de 10 meses.

El resto de los trabajos, tales como la losa intermedia o las galerías de conexión, se realizaron de modo simultáneo al avance, unos cientos de metros por detrás del frente de modo a cumplir con el plazo tan limitado de los respectivos contratos.



Foto 2. Tuneladora Mitsubishi en la factoría Duro Felguera en fase de pruebas.

DESARROLLO DE LOS TRABAJOS EN EL TÚNEL SUR

El contrato del túnel Sur fue adjudicado a la UTE formada por DRAGADOS y FCC las cuales adjudicaron finalmente la construcción de su tuneladora a MHI-DF, asociación de Mitsubishi con la española Duro Felguera, con el objeto de fabricar el mayor número de componentes en España y tomando esta última la responsabilidad del diseño del "back up".

El retraso en la construcción de la máquina se debió por una parte al limitado número de factorías en Europa capaces de construir los enormes componentes de esta máquina, tales como el rodamiento principal, y por otra parte a la falta de idoneidad de las instalaciones de Duro Felguera para construir *la mayor tuneladora del mundo* lo que motivó manipulaciones imprevistas y alteraciones en la planificación inicial de construcción. Sin embargo, gracias a un diseño verdaderamente acertado y a la calidad de la fabricación se consiguió fabricar una máquina realmente competitiva y que permitió recuperar los retrasos acumulados.

Tras un mes de transporte desde la factoría de Barros en Asturias hasta Madrid, se emplearon tres meses en el montaje en el pozo de ataque, lo cual es razonable considerando las dimensiones del equipo así como las restricciones y limitaciones en los accesos y zona de obras. En la Foto 3 se puede observar el pozo de ataque junto al trazado de la M-30 de ese momento, cuyas aglomeraciones de tráfico en horas punta afectaron el normal desarrollo de los trabajos.

1. Excavación del Túnel Sur

La excavación del túnel Sur comenzó el 11 de abril de 2006 utilizando recursos provisionales de desescombro ya que, como se ha indicado anteriormente, las limitaciones del pozo de ataque no permitían el montaje completo de la tuneladora ni de su cinta permanente de retirada de escombros. Tras 10 días de trabajo y 64 metros de túnel excavados (lo que incluye el paso bajo los invernaderos que pueden observarse en la Foto 3) fue necesario detener las excavaciones



Foto 3. Pozo de ataque del túnel Sur.

durante una semana a fin de continuar con el montaje del "back up" e instalaciones auxiliares.

El avance de los primeros 240 m, como se aprecia en la Figura 7, estuvo marcado por una parte por la curva de aprendizaje de todo el equipo y por el conservadurismo en el manejo de la tuneladora a fin de analizar su comportamiento. No podemos olvidar que la mayor EPB hasta la fecha era la utilizada en la Línea 9 del Metro de Barcelona y que tiene 12 m de diámetro. El incremento de más del 50% en sección era motivo más que suficiente para proceder con cautela en los primeros metros de túnel.

El 17 de mayo fue necesaria una nueva parada de 15 días a fin de completar el montaje de las instalaciones de desescombro permanentes, retirar la estructura de empuje y completar la playa de vías en el pozo de ataque. Adicionalmente se produjo una avería en la grúa que transportaba las dovelas en el "back up" entre el punto de descarga de los vagones y el alimentador de dovelas lo que obligó a un rediseño completo de este elemento por parte del fabricante.

A partir de ese momento se consiguió un avance continuo y constante tal y como muestra la gráfica de la Figura 7, gracias al manejo de la tuneladora por un equipo altamente cualificado y con las experiencias previas en las sucesivas extensiones del Metro de Madrid o en la excavación de los túneles de Guadarrama (28 km), entre otros. Prueba de ello son los rendimientos finalmente obtenidos.

Como resumen de dichos resultados, las cifras finales son las siguientes:

- Producción media diaria: 18,3 metros/día,

- Producción media mensual: 557 metros/mes,
- Máxima producción diaria: 46 m (9 de octubre de 2006),
- Máxima producción mensual: 791 m (octubre de 2006), y
- Mejor producción en 30 días de trabajo: 928 m (del 22 de septiembre al 21 de octubre).

Las cifras hablan por sí solas y tras 200 días de trabajo el cale fue la culminación de esta espectacular excavación que, comenzando el 11 de abril, concluía el 27 de octubre de 2006 (ver Foto 4).

Cabe mencionar que, si las condiciones de trabajo en el portal de ataque no hubieran sido tan restrictivas en términos de espacio y hubiera sido posible montar tanto la tuneladora como las instalaciones permanentes en su totalidad desde el primer día, no hubieran sido necesarios los 21 días de parada antes indicados y los rendimientos finales hubieran ascendido a 20,5 m/día y se hubieran superado los 615 m/mes.

2. Lecciones aprendidas acerca de la excavación

La excavación del túnel Sur del By pass Sur del proyecto de la Calle 30 de Madrid, confirmó nuestras mejores expectativas acerca de los túneles de gran diámetro y más concretamente de su ejecución. La conclusión que debe de tenerse en cuenta para el futuro es que la velocidad de excavación (producción) no está condicionada por el diámetro del túnel sino por la elección de la maquinaria adecuada en función de la geología prevista a lo largo del trazado, por el diseño de unas instalaciones acordes a dichas producciones y por el manejo de todo el conjunto por un equipo de profesionales altamente cualificados en este tipo de trabajos.

La reserva de potencia de la cabeza de corte, del par y del empuje de la tuneladora se han mostrado como herramientas altamente eficaces cuando las condiciones del terreno empeoran, evitando averías y paradas inesperadas.

El agitador central diseñado para homogeneizar el terreno en la parte central de la cámara y evitar atascos en la misma ha probado ser una herramienta sencilla y muy útil en máquinas de gran diámetro.

El doble erector ha sido empleado más como erector suplente que como había sido concebido

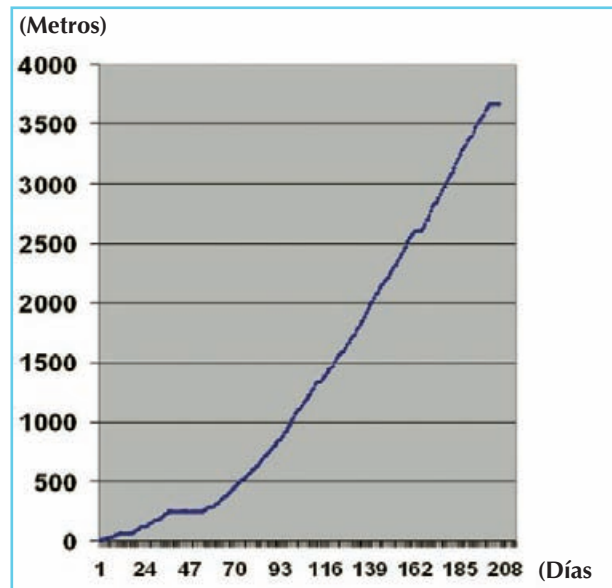


Figura 7. Producción acumulada en túnel Sur.



Foto 4. Cale del túnel Sur.

originalmente y se ha descrito en el apartado 2 *Diseño Japonés*. El tiempo empleado en la inversión de los mandos a fin de utilizar la mesa de vacío opuesta a la que se encuentra en uso en un momento dado, es mayor que el tiempo ganado con el menor recorrido del mismo para la colocación de la dovela correspondiente. Por el contrario, el disponer de una segunda mesa de vacío ha permitido no detener el ciclo de montaje de un anillo por avería de la mesa, procediendo a su reparación durante la excavación



Foto 5. Erector de dovelas.

del siguiente ciclo o durante las paradas programadas de mantenimiento. Con ello se ha conseguido una mejora en la producción (Foto 5).

3. Losa intermedia de rodadura

El proyecto original preveía una losa intermedia ejecutada *in situ*, soportada por dos pilares centrales y apoyada en ménsulas situadas en ambos extremos como se puede observar en la Figura 2. Este diseño fue modificado por otro que, con el mismo resultado final, simplificaba su ejecución dejando diáfana la zona inferior del túnel, como se aprecia en la Figura 1.

Un encofrado de 24 m de longitud permitió la realización de esa misma longitud de ménsula cada día (Foto 6). La armadura se colocó mediante otro carro independiente de éste y situado entre esta y el “back up” de la tuneladora. Desde la parte trasera de este último se realizaron las perforaciones en las dovelas que permitieron dejar las esperas de las armaduras para su conexión con el revestimiento del túnel.



Foto 6. Encofrado para la ejecución de las ménsulas.

El hormigón necesario para la construcción de las ménsulas se suministró mediante camiones que circulaban por la losa dejando libre las dos vías inferiores para el suministro de materiales a la tuneladora. La distancia entre losa y ménsulas se mantuvo en unos 200 m, estando dispuesta al final de aquella una bomba de hormigón que mediante tubería enviaba la mezcla hasta el encofrado de ménsulas.

La siguiente operación consistía en la colocación de apoyos de neopreno que servirían de apoyo a las losas prefabricadas. Estas, con un ancho de 2 m, eran transportadas desde el portal mediante tractor y remolque y colocadas en su posición final con ayuda de una carretilla elevadora (Foto 7).

A medida que se avanzaba con la colocación de losa se desplazaban tanto la bomba de hormigón como las tuberías a fin de mantener las distancias entre los distintos tajos de trabajo y lograr realizar la totalidad de actividades desde la losa superior. La distancia de 200 m es necesaria para permitir alcanzar al hormigón de las ménsulas la resistencia necesaria para soportar las cargas de la losa.

La actividad crítica que condicionaba el avance de toda la operación era el hormigonado de las ménsulas por lo que el rendimiento global fue de 24 metros al día de losa terminada.

Otra de las actividades importantes fue la ejecución de las galerías de conexión que, realizadas siguiendo el método de Madrid, fueron excavadas a partir de la propia losa de rodadura hasta calar al túnel adyacente y conectar con la zona inferior, según los casos.



Foto 7. Instalación de la losa prefabricada.

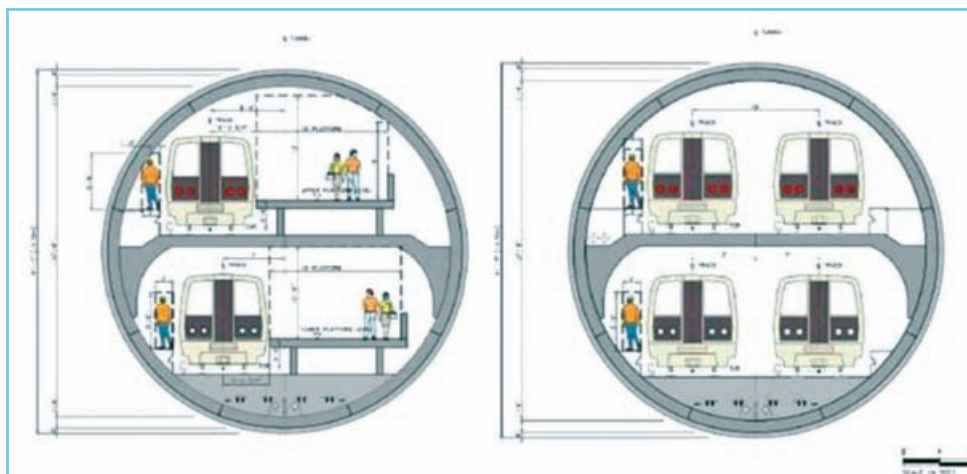


Figura 8. Alternativa en túnel para Tysons Corner

agua, electricidad, gas o telecomunicaciones, que permitan nuevos desarrollos de túneles urbanos. Si se transfieren las infraestructuras al espacio subterráneo y se regeneran los espacios verdes en superficie se contribuirá a un mayor desarrollo sostenible y una mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

CONCLUSIONES

La utilización de las tuneladoras EPB más grandes del mundo en el proyecto de la Calle 30 es un enorme paso adelante en la tecnología actual de construcción de túneles, no solamente por las elevadas prestaciones en términos de potencia, par y empuje sino también por la complejidad de las instalaciones y servicios necesarios para atender las demandas generadas por un túnel de estas dimensiones.

Con este ánimo, y basándose en las experiencias previas del Metro de Madrid, el Ayuntamiento de Madrid se ha enfrentado con éxito a este faraónico proyecto que, sin duda, influirá en una circulación mas fluida y segura al tiempo que regenera los espacios verdes en superficie tan demandados por los ciudadanos.

Dentro del proyecto de la Calle 30 se prevén acciones similares en el denominado By pass Norte donde se sustituiría el trazado actual a través de la Avda. de la Ilustración, regulado por semáforos, por un trazado subterráneo que permitiría asimismo conectar con la nacional N-1 en las proximidades del anillo exterior M-40. El cierre de la M-50 a través del Monte del Pardo es otro de los proyectos donde este tipo de soluciones sería de aplicación, dadas las restricciones medioambientales de este área de especial protección.

Pero no debe de pensarse solamente en túneles carreteros sino en soluciones multifuncionales donde todo el espacio interior de la sección circular generada por la excavación de la tuneladora, pueda ser utilizado para ubicar carreteras, ferrocarriles, Metros ligeros, emergencias y, por supuesto, conducciones de

Ejemplos como el proyecto SMART en Kuala Lumpur, donde se utiliza la parte inferior de un túnel carretero como tanque de tormentas pudiendo incluso llenar la totalidad del túnel en el caso de lluvias excepcionales, el proyecto del túnel del Puerto de Miami, entre las islas de Dodge y Watson o la propuesta subterránea alternativa al trazado aéreo previsto en Tysons Corner para el nuevo Dulles Corridor Metrorail Project entre Washington D.C. y el aeropuerto de Dulles (Virginia) son nuevas soluciones que resuelven los problemas de las zonas urbanas densamente pobladas (Figura 8).

Los últimos desarrollos tecnológicos de las tuneladoras y los novedosos diseños de las ingenierías, de acuerdo con las demandas de los clientes y hechos realidad gracias al personal cualificado de las empresas constructoras, han abierto un futuro esperanzador en la construcción de túneles, mas allá de las expectativas actuales más optimistas.

BIBLIOGRAFÍA

- I. Monzón, A., Pardillo, J.M., et al.. Abril 2005 "The M-30 ring road improvement project in terms of a sustainable mobility strategy for Madrid" Revista de Obras Publicas Madrid, España.
- II. Sauer, G. December 2005 "Tunnel engineering" Transportation and Mobility Conference. Houston, U.S.A.
- III. Melis, M., Amaiz, M., Fernandez, E. Febrero 2006 "The Madrid renewal inner ring Calle 30 with the largest EPB machines" International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling ISUET Bangkok, Thailand.

Túneles con tuneladoras. Las mayores tuneladoras del mundo (II)



Tunnels built with tunnelling machines. The world's largest tunnelling machines (II)

Santiago SERRANO PÉREZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Zona Centro Acciona Infraestructuras
Gerente de la UTE BY-PASS SUR TÚNEL NORTE
(Acciona Infraestructuras - Ferrovial-Agromán)

RESUMEN

Se describe primero la obra del BY-PASS SUR donde se ha utilizado la tuneladora "Dulcinea" de 15,20 m de diámetro: trazado en planta, sección transversal y geología atravesada. A continuación, tras una reflexión sobre la evolución del diámetro de las ruedas de corte de las tuneladoras, se describen las características técnicas de la máquina y se resumen los avances tecnológicos mas relevantes incorporados a "Dulcinea", como son: la doble cabeza de corte, el sistema de avance del primer remolque, el dispositivo para el cambio de herramientas, el doble mecanizado de la corona exterior, el anillo de sostenimiento y el paso giratorio.

A continuación se exponen los rendimientos alcanzados por la tuneladora y se describen las instalaciones necesarias en el pozo de ataque, haciendo especial hincapié en el problema de la logística en este tipo de obras urbanas. El artículo concluye con una reflexión sobre la utilización de este tipo de máquinas en próximos proyectos de túneles de carreteras.

Palabras clave: M-30, By-Pass Sur, Tuneladora, Rueda de corte, Pozo de ataque

ANTECEDENTES

La tuneladora *Dulcinea*, Escudo de Presión de Tierras (EPB), fabricada en Alemania por Herrenknecht y encargada por la UTE By Pass Sur Túnel Norte formada por las empresas: Ferrovial-Agromán y Acciona Infraestructuras, se ha utilizado para la ejecución del túnel norte del By Pass Sur de la M-30 (calzada izquierda de la conexión del Paseo de Santa M^a de la Cabeza con la N-III, correspondiente al By-Pass Sur de la M-30).

La obra se enmarca dentro del Plan de Reforma y Gestión integral de la M-30 y más concretamente en su tramo Sur. Los objetivos de este ambicioso plan han sido: vertebrar la ciudad, reducir la accidentalidad, disminuir la contaminación, ampliar las zonas verdes, recuperar el río Manzanares y mejorar la movilidad.

1. Descripción de la Obra

El By Pass Sur de la M-30, que se trata específicamente en otro de los artículos de este número especial, es un tramo subterráneo constituido por dos túneles gemelos unidireccionales.

El túnel norte (ver Figura 1) se inició en un pozo de ataque construido en la M-30 entre el Puente del Mediterráneo y el Puente de Vallecas. El trazado discurre junto a los estribos del Puente de Los Tres Ojos y en paralelo al viaducto existente sobre la Avenida de la Albufera. Los dos túneles continúan paralelos a la M-30 a una distancia de 30 m y a continuación cruzan el Parque de Enrique Tierno Galván donde alcanzan su máxima profundidad.

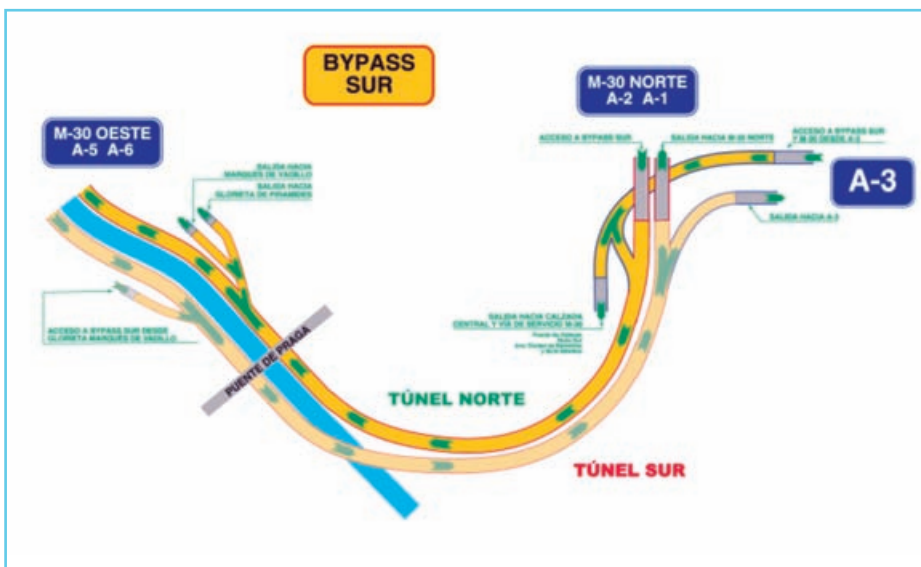


Figura 1. Esquema del trazado de los túneles norte y sur del By-Pass Sur de la M-30.



Figura 2. Sección transversal del túnel, con sistema de ventilación, calzada de circulación y galería de emergencia.

Continúan bajo el Barrio de Legazpi, Barrio de Delicias, Paseo de la Chopera y Parque del Matadero de Arganzuela, para terminar en un Pozo situado en el Parque de La Arganzuela junto al Palacio de Cristal (pozo de ataque de la tuneladora del túnel sur) donde se conecta con el tramo siguiente del soterramiento de la M-30.

2. Sección Transversal

La calzada tiene tres carriles de circulación de 3,5 m de ancho cada uno, arcenes de 0,20 m y aceras de 0,90 m, que suman 12,70 m de gálibo horizontal necesario (ver Figura 2). El diámetro interior del túnel ejecutado y revestido es de 13,45 m. El gálibo vertical libre es de 4,50 m, lo que permite el paso de camiones por el túnel.

En la parte superior de la sección se dispone un conducto de ventilación por el que se extrae el aire contaminado del túnel y se canaliza hacia los pozos de ventilación.

Por la parte inferior, bajo la losa de tráfico, circula el aire limpio procedente del exterior a través de los pozos de ventilación, y se introduce en la zona de circulación a través de las rejillas de ventilación situadas en los laterales del túnel. Además, esta zona se utiliza como galería de emergencia, para la evacuación de personas en caso de incendio y como acceso de vehículos de emergencia al lugar del incidente.

GEOLOGÍA

El terreno atravesado está constituido por materiales terciarios de la cuenca de Madrid, principalmente arcillas, peñuelas y yesos, con espesores variables, alcanzando 40 m de espesor al norte del trazado y 15 m al sur.

Las formaciones yesíferas se presentan siempre intercaladas entre las peñuelas. Estas formaciones están recubiertas por:

- sedimentos cuaternarios de origen aluvial formados por arenas flojas y limos blandos cuyo espesor no sobrepasa los 6-7 m, y
- rellenos antrópicos de naturaleza diversa, con espesores variables entre 5-6 m, excepto en la zona del parque Enrique Tierno Galván que llega a alcanzar los 20 m de espesor.

DISEÑO DE LA TUNELADORA

1. Evolución del diámetro de la rueda de corte

En los últimos años, se ha producido una constante evolución en la tecnología de las máquinas tuneladoras. Aprovechando la experiencia en la ejecución de las obras, tanto los proyectistas como los fabricantes, se han atrevido a aumentar progresivamente el diámetro de las máquinas para acometer proyectos más ambiciosos, impensables hace unos años.



Figura 4. Evolución del diámetro de las ruedas de corte.

La Figura 4 muestra dicha evolución en nuestro país pasando de la tuneladora utilizada en el metro de Valencia para vía única y diámetro 6,52 m, las tuneladoras utilizadas en el metro de Madrid para vía doble de 9,40 m de diámetro, las utilizadas en el metro de Barcelona de 12,06 m de diámetro para vía doble y con posibilidad de alojar los andenes de las estaciones en dos niveles superpuestos. Por último, la experiencia en estas obras ha servido para aventurarse en el diseño, construcción y ejecución de la obra del By Pass con la tuneladora de 15,20 m de diámetro.

2. Características Técnicas

Las principales características técnicas de esta tuneladora, que ha sido la utilizada en el túnel del By Pass Sur, se presentan en la Tabla 1.

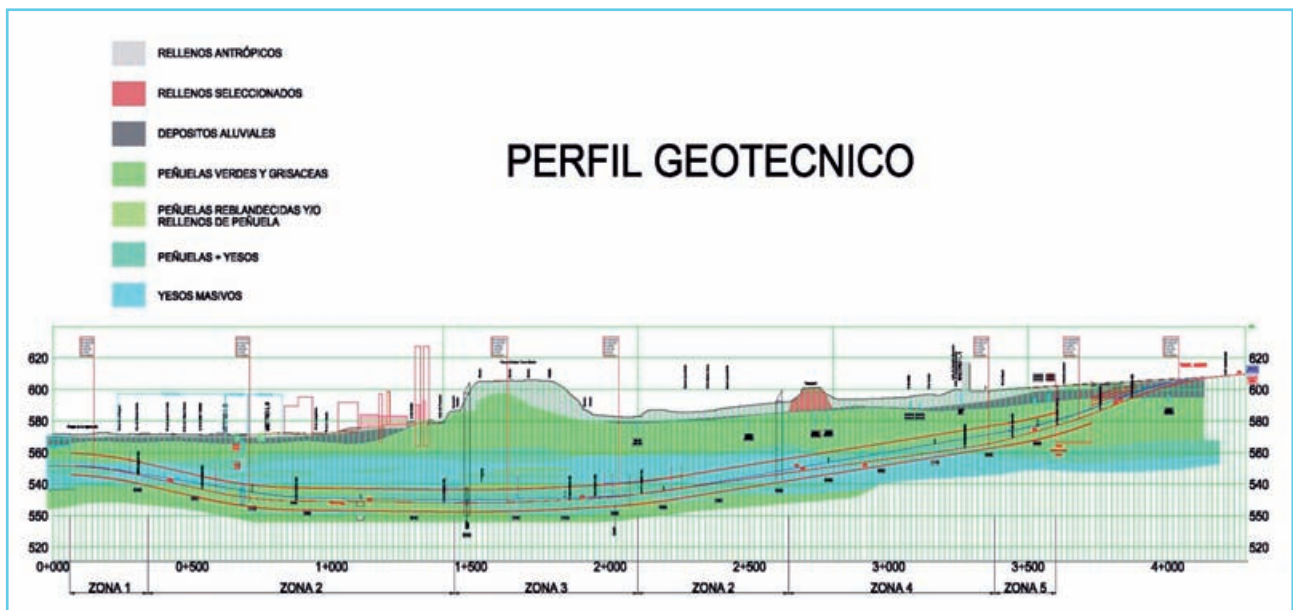


Figura 3. Perfil geotécnico de la zona del túnel.



Foto 1. Vista de la rueda de corte, con la doble cabeza de corte, una exterior y otra interior.

3. Avances tecnológicos más relevantes

En los siguientes apartados se exponen sucintamente los principales avances tecnológicos de la tuneladora utilizada en la obra del túnel.

3.1. Doble cabeza de Corte, una exterior y otra interior

La doble cabeza de corte, una exterior y otra interior, se realiza con giro independiente, pudiendo girar en contrarrotación o sincrónicamente. El giro en contrarrotación, que es el habitual, minimiza el par de giro del escudo durante la excavación al contrarrestarse parcialmente los pares resultantes de ambas ruedas (ver Foto 1).

El par de trabajo nominal de la rueda de corte interior es de 845 t \cdot m y el de la rueda exterior de 9.600 t \cdot m (relacionadas entre sí por el cubo del diámetro). La reducción de par con las ruedas funcionando a contrarrotación es de un 17%.

La cabeza de corte exterior tiene un porcentaje de superficie abierta de un 32%, y la cabeza de corte interior de un 30%.

Control de avance de la cabeza de corte interior: además, es posible avanzar la cabeza hasta 400 mm sobre la cabeza de corte exterior para poder hacer un *túnel-guía* que facilita la excavación del resto de la sección, hasta llegar a los 15,16 m de diámetro.

3.2. Sistema de avance del 1^{er} remolque (Paso peregrino)

El primer remolque (en él se alojan los silos, bombas de mortero, y los transformadores) es el más pesado del *“back-up”* (510 t), y el primero en apoyar en anillos de reciente colocación (ver Foto 2).

Diámetro de excavación	15,20 m
Longitud del escudo	11,50 m
Peso del Escudo	2.565 t
Empuje máximo	315.880 Kw
Velocidad máxima de penetración	65 mm/min
Potencia en la rueda de corte	14.000 Kw
Nº de gatos de empuje	57 ud
Elementos de corte:	
picas	372
rastreles	32
cortadores	66
Superficie abierta	32%
Longitud total (Escudo + remolques)	110 m
Peso <i>“back-up”</i> ^(a)	1.800 t
Par máximo desbloqueo	125 MN/m
Velocidad máxima rotación	2 rpm
Nº motores hidráulicos	50 en rueda exterior 10 en rueda interior
Tornillos de extracción	2 ud de 1.250 mm de diámetro 1 ud de 600 mm de diámetro
Capacidad de extracción de los tornillos	2.050 m ³ /h
Capacidad de extracción de la cinta	2.884 t/h
Capacidad de los equipos de inyección de espumas en frente y cámara	417 m ³ /h
Inyección de mortero en <i>“gap”</i> ^(b)	12 orificios (6 bombas)
Cilindros de articulación pasiva entre escudo delantero y escudo de cola	

(a) Tren de carretones que arrastra la tuneladora y en el que se sitúan las instalaciones necesarias para su funcionamiento. En el caso de Tizona son 8 remolques de 2-3 pisos y 134 m de longitud total.

(b) Sobreexcavación que hace la rueda de corte sobre el diámetro exterior de la tuneladora, y que permite a ésta el deslizamiento y pequeños cabeceos para poder describir las curvas del trazado. Tiene influencia en los asientos que puede producir una tuneladora.

Tabla 1. Características técnicas de la tuneladora empleada en el túnel del By Pass Sur.

Para garantizar una mayor distribución de las cargas sobre el anillo de dovelas, se ha dispuesto un sistema de avance de paso de peregrino, consistente en ocho apoyos fijos y ocho móviles que se alternan a la hora de sostener el carro. Los apoyos fijos lo sujetan durante la colocación del anillo, cuando la máquina está parada; y los apoyos móviles lo hacen en fase de excavación cuando la máquina se mueve.

Los apoyos móviles recorren 2 m de carrera en su movimiento longitudinal en cada fase de excavación y una vez que ceden la carga a los apoyos fijos, vuelven a su posición original recuperando la carrera en sentido inverso.

3.3. Dispositivos para el cambio de herramientas

Un aspecto que adquiere relevancia con el aumento del diámetro, es el aumento del número de herramientas de corte, y la posible repercusión en tiempos de parada que puede llegar a tener dicho cambio.

Se ha estudiado sobre todo el caso de la herramienta mas pesada, los discos de corte. Son discos dobles, de 17" similares a los empleados en tuneladoras del metro de Madrid, pero su número pasa de 20 a 66 discos (16 en la rueda de corte central y 50 en la exterior). El peso del conjunto de disco y bulón es de 160 kg.

Por ello desde la fase de diseño se ha estudiado la secuencia de operaciones de modo que sea una tarea sistemática y realizable por el operario en un tiempo razonable.

Se han dispuesto (ver Figura 5):

- 2 grúas hidráulicas con brazo articulado para el manejo de las herramientas en el escudo.
- 2 cámaras hiperbáricas para entrada de personal a la cámara de presión, y 3 para entrada de materiales.
- Plataformas de trabajo retráctiles, para acceso del personal en la cámara de tierras durante el cambio de herramientas e inspecciones.
- 2 poleas auxiliares en el interior de la cámara de tierras, para poder manejar cómodamente las herramientas.
- El diseño de enganche de los discos cortadores se ha hecho de modo que el cambio de herramientas se pueda realizar sin dificultades desde el interior de la cámara de tierras.

3.4. Doble Mecanizado de la corona exterior

Uno de los aspectos esenciales del diseño de la máquina ha sido la ubicación de los motores para conseguir el par solicitado por el cliente (10.700 t x m en desbloqueo). Para ello ha sido necesario disponer 60 motores hidráulicos; 10 en la rueda de corte interior y 50 en la exterior (Foto 3).

Los 50 motores de la rueda de corte exterior quedan 29 dispuestos en la cara exterior de la corona y 21 en la cara interior (Foto 4).



Foto 2. Primer remolque, con apoyos fijos y móviles.

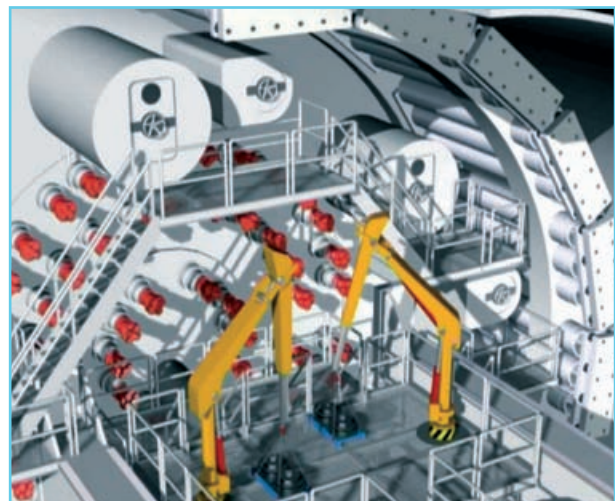


Figura 5. Esquema del sistema diseñado para el cambio de los discos de corte.



Foto 3. Ubicación de los motores en la rueda de corte, con un total de 60 motores.

Resulta así una corona exterior mecanizada con doble tallado para realizar el ataque de los piñones en las dos caras, y que con un diámetro de 7500/6140 mm es la pieza mas grande que se ha mecanizado en Europa.

3.5. Anillo de sostenimiento

Entre el escudo y el accionamiento se ha intercalado un anillo de sostenimiento. Es un anillo cerrado formado por dos piezas, que arriestra los seis sectores del escudo. Esta estructura reparte los esfuerzos de empuje y de par entre el escudo y el accionamiento (ver Foto 5).

3.6. Paso giratorio

El paso giratorio es un elemento que se encuentra entre la rueda de corte (móvil) y el eje de la máquina (fijo); en él están dispuestos los conductos que permiten llevar a la rueda de corte agua, espumas o polímeros (ver Foto 6).

Como consecuencia de la doble rueda de corte se han dispuesto dos pasos giratorios:

- El de la rueda interior de tamaño convencional 0,44 m de diámetro, y que permite los siguientes pasos:
 - Espumas, polímeros y bentonita: 8 líneas (8 bares de presión),
 - Agua a alta presión: 2 líneas (300 bar),
 - Sistema hidráulico para los sobrecortadores: 5 líneas (300 bar), y
 - Sistema eléctrico: que va por otro lado.
- El de la rueda exterior que tiene 4 m de diámetro. En realidad con este diámetro no había forma de meter un sellado de línea de 300 bar con lo cual solo tiene líneas de 8 bar; espumas, polímeros y bentonita (14 líneas).

RENDIMIENTOS

La longitud del tramo excavado ha sido de 3.526 ml. El tiempo transcurrido desde la puesta en marcha de la máquina hasta el cale ha sido de 230 días, por lo que el rendimiento ha sido de 15,33 ml/día (7,67 anillos día, ver Figura 6).

La máxima longitud de túnel revestido ejecutado en un día ha sido de 36 ml (18 anillos, en la segunda quincena de mayo).

La media móvil mensual, es decir, la media alcanzada en un periodo de 30 días seguidos ha sido de 25 ml/días



Foto 4. La corona exterior lleva 50 motores, 29 en la cara exterior y 21 en la cara interior.



Foto 5. Anillo de sostenimiento, formado por dos piezas que arriestra los sectores del escudo.



Foto 6. Paso giratorio, donde se disponen los conductos de agua, espumas o polímeros.

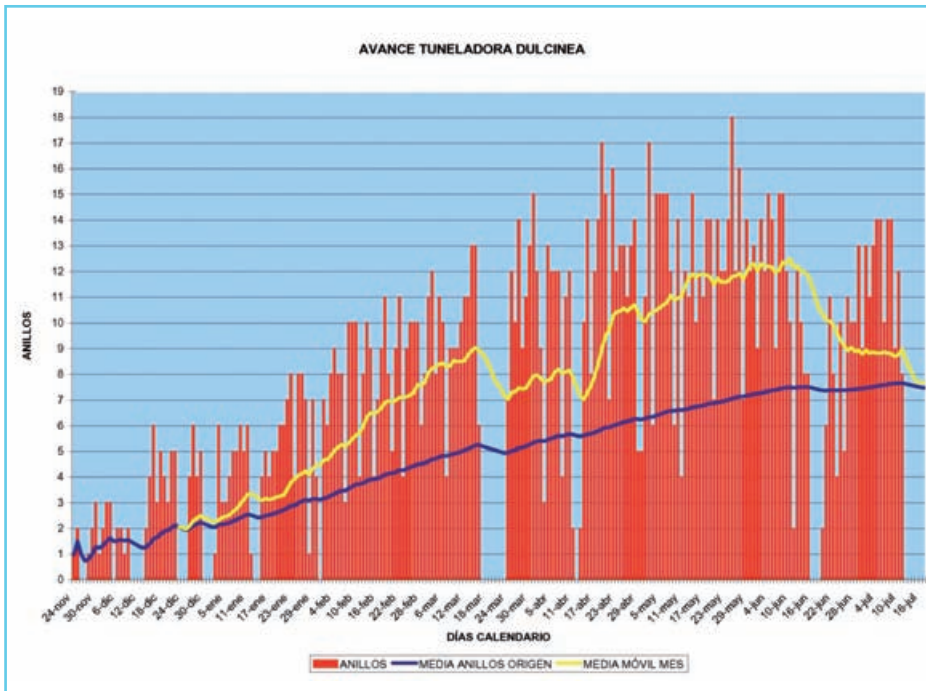


Figura 6. Rendimiento diario de anillos obtenido en el avance de la tuneladora.

(12,5 anillos día, ver Figura 6), que suman 375 anillos y 750 ml/mes.

El tiempo invertido en el montaje de la tuneladora fue de 3 meses y en el desmontaje, 2 meses.

INSTALACIONES DEL POZO DE ATAQUE. LOGÍSTICA

El problema fundamental de este tipo de obras en el centro de la ciudad es la logística. El pozo de ataque de la tuneladora tiene unas dimensiones de 95 m de largo, 30 m de ancho y 35 m de profundidad. Está ejecutado con pilotes y arriostrado a distintos niveles con estampidores de hormigón armado.

En el entorno de dicho pozo (ver Foto 7), hay que reservar espacio para el montaje de la tuneladora, para el acopio de dovelas, para la subestación eléctrica necesaria, para el almacén de piezas de recambio de la tuneladora, para el acopio de las vigas que forman la losa de calzada y las placas alveolares de la losa superior, para las oficinas de obra, para el foso donde se depositan provisionalmente las tierras procedentes de la excavación, para el depósito de agua de refrigeración de la tuneladora, y para los caminos de acceso tanto para camiones de tierras, como de los transportes especiales que suministran los prefabricados (dovelas, vigas, losas, etc.).

El proyecto inicial contemplaba la instalación de las dos tuneladoras en el mismo pozo, con lo que el problema del espacio se duplicaba y hacía prácticamente inviable el proyecto. Se decidió ejecutar un nuevo pozo de ataque en la M-30 a la altura del puente del Mediterráneo, de forma que las dos tuneladoras avanzaran en sentido contrario.

Si para dimensionar las instalaciones utilizamos la media móvil obtenida, es decir 12,5 anillos/día (25 ml/día), esto supone 180 m³ de excavación sobre perfil por metro lineal, que esponjados son aproximadamente 300 m³/ml. Cada día se excava, por lo tanto, 7.000 m³ de material

esponjado, lo que supone (trabajando 24 horas al día), que tiene que salir de la obra un camión de tierras cargado cada 2 minutos (y entrar otro camión descargado a la obra).

En cuanto a las dovelas, hay que colocar al día 125 dovelas, lo que supone que cada día entran a la obra aproximadamente 60 transportes especiales, a los que hay que sumar los que suministran vigas, losas, mortero, etc.

Por todo ello, el diseño de los caminos de circulación en la obra requiere un estudio detallado de estos movimientos internos.

En la parte superior de los pozos, se sitúan dos pórticos de 60 t para facilitar el suministro de materiales al túnel (dovelas, mortero, vigas, losas,... etc).

La extracción de las tierras se efectúa mediante cinta continua desde la tolva de descarga de los tornillos sin fin de la tuneladora hasta el foso de tierras ya en el exterior del pozo de ataque. La cinta tiene una anchura de 1,60 m y una capacidad de 2.884 t/h.

En el fondo del pozo de ataque se dispone la playa de vías para el movimiento de entrada y salida de los trenes, los fosos para el mantenimiento de estos, la estructura de reacción necesaria para el avance de los primeros metros de túnel, los silos de mortero, y parte del acopio necesario para las dovelas.



Foto 7. Vista del pozo de ataque y de su entorno.

CONCLUSIONES

Aprovechando la experiencia adquirida durante ocho años en las obras de ampliación del metro de Madrid en la ejecución de túneles con tuneladoras de presión de tierras de gran diámetro, los técnicos del Ayuntamiento de Madrid, decidieron acometer los túneles del By-Pass Sur de la M-30 con las tuneladoras más grandes jamás construidas.

El salto al vacío que suponía el aumento de diámetro de 9 a 15 m, provocó, en los inicios del proyecto, una incertidumbre considerable. El efecto escala no aseguraba el éxito de la operación.

Los detallados proyectos de implantación para resolver los problemas de logística, la acertada decisión del cambio de sentido de una de las tuneladoras ejecutando un segundo pozo de ataque, la calidad del proyecto, la colaboración de la asistencia técnica de la dirección de obra, la efectividad de los tratamientos del terreno diseñados con la ayuda de prestigiosos asesores geotécnicos, la rapidez y efectividad en la toma de decisiones por parte de la dirección de obra y la calidad, experiencia y dedicación de los equipos que las empresas Ferrovial-Agromán y Acciona

Infraestructuras han aportado a la Unión Temporal de Empresas encargada de los trabajos, han permitido culminar la obra con unos rendimientos impensables al principio de la obra.

Conocidos los excelentes resultados en la ejecución de este túnel, las administraciones y proyectistas deberían tener en cuenta esta experiencia para utilizar estas tuneladoras en el proyecto y ejecución de grandes túneles carreteros de tres carriles y gálibo para paso.

BIBLIOGRAFÍA

- I. Melis Maynar, M. "Las tuneladoras de 3 carriles de la M-30, las mayores y más potentes jamás fabricadas". Revista de Obras Públicas. Abril 2005.
- II. Arnaiz Ronda, M. "Túnel de la M-30 de Madrid. Infraestructura necesaria" CAUCE 2000 n° 138, año 2007.
- III. Presa Matilla, J. "La construcción de túneles con tuneladora". Madrid M-30. Un Proyecto de transformación Urbano. TURNER. 