

I Congreso Multisectorial de la Carretera

EXPERIENCIA EN OBRA CON UNA MEZCLA BITUMINOSA RECICLADA TEMPLADA CON ALTA TASA DE MATERIAL DE FRESADO

AUTORES COLABORADORES

Marisol Barral (Campezo Obras y Servicios s.a.)
mbarral@campezo.com

Jose Antonio Navarro (Diputación Foral de Gipuzkoa)
janavarro@gipuzkoa.net

Antonio Garcia Siller (Cepsa)
a.garcia.siller@cepsa.com

Miguel Cembrero (Asfaltia s.l.)
mcebrero@asfaltia.com



| 1.INTRODUCCIÓN

La rehabilitación estructural de un firme tiene como objetivo aumentar su capacidad estructural, adecuándola a las acciones del tráfico previsto durante su período de servicio, y simultáneamente mejorar sus características funcionales referentes a seguridad y comodidad, así como proteger el conjunto del firme en términos de durabilidad, impermeabilidad y uniformidad, consiguiendo una mejora de la regularidad longitudinal y transversal y de la textura superficial. Dicha rehabilitación puede realizarse empleando alguno de los procedimientos siguientes:

- Eliminación parcial y reposición del firme existente, aplicando alguna de las técnicas de reciclado en frío o en caliente.
- Recrecimiento del firme, consistente en la colocación de una o varias capas nuevas sobre el pavimento existente, elevando por tanto la cota de la superficie de rodadura.
- Reconstrucción total del firme, aplicable cuando el nivel de agotamiento estructural llega a afectar a la explanada.

La carretera GI-3591 "Al Santuario de Arantzazu (Oñati)" tiene una longitud total de 8.500,00 m. El tramo comprendido entre los p.k. 2,960 y 8,180, correspondientes a la intersección con la GI-3592 "Al barrio de Araotz (Oñati)" y la explanada del Santuario, tiene una Intensidad Media Diaria de vehículos (IMD) de 494, referida al año 2013 y soporta una categoría de tráfico tipo T 3B, que corresponde a una IMD de vehículos pesados comprendida entre 50 y 100 en cada uno de los carriles de la calzada.

Con el fin de evaluar el estado estructural del firme en este tramo de carretera se realizó en el año 2010 un estudio de deflexiones, empleando un deflectómetro de impacto, que puso de manifiesto el agotamiento estructural del firme y la necesidad de proceder a su rehabilitación, para restituir la capacidad estructural del firme por alguno de los procedimientos antes descritos.

Inicialmente, en el año 2010 se redactó un proyecto de rehabilitación estructural del firme, donde se contemplaba el empleo de la técnica del reciclado en frío in situ con emulsión y el recrecimiento posterior con mezcla bituminosa en caliente, en capas de 8 y 6 cm de espesor, respectivamente. Sin embargo, las incertidumbres generadas sobre el empleo de esta solución, debido a la existencia en el firme de la calzada de una capa de macadam, con áridos de tamaño elevado y el reducido espesor del pavimento bituminoso, que contaba solamente con un tratamiento superficial y una delgada capa de mezcla bituminosa, así como la debilidad mecánica que presenta este tipo de tratamiento en los primeros momentos tras su puesta en obra, hicieron descartar el empleo de esta solución como tratamiento idóneo para la rehabilitación de este tramo de carretera.

Posteriormente, en el año 2013 se redactó un proyecto modificado, contemplando la rehabilitación estructural del firme mediante su recrecimiento con una capa constante de 6 cm de espesor de mezcla bituminosa reciclada templada, realizando los saneos y reperfilados previos en aquellos

subtramos donde resultaban necesarios. Dicha actuación ha sido ejecutada en el verano del 2014 por la empresa Asfaltia s.l. La cantidad de mezcla extendida ha sido superior a 5.000 toneladas aplicándose los criterios de sostenibilidad y eficiencia de recursos, naturales y económicos, en la conservación de firmes de carreteras del País Vasco.

Las técnicas de rehabilitación que contemplan la eliminación parcial del firme existente, genera abundante material procedente del fresado de las capas bituminosas existentes. Este material de fresado está constituido por áridos, envueltos por una película de ligante bituminoso envejecido y, por tanto, de alto valor técnico y económico, cuya reutilización o reciclado es deseable, tanto por motivos económicos como medioambientales. Además, está el hecho de que el transporte a vertedero de este material resulta difícilmente justificable cuando se toman en consideración los costes de los áridos y el ligante.

Teniendo en cuenta que con carácter simultáneo, a la obra de rehabilitación del firme de la carretera GI-3591 (Arantzazu), se han ejecutado por parte de la misma empresa Asfaltia s.l., la obra de rehabilitación de la autovía N-I en la calzada del sentido Irún-Vitoria entre las localidades de Idiazabal y Beasain, consistente en el fresado previo del firme existente y reposición posterior con dos capas de mezcla bituminosa, en capas de espesor variable entre 10 y 12 cm, la generación de un importante volumen de material de fresado ha dado lugar a la posibilidad de empleo de este material en la rehabilitación estructural del firme de una carretera de menor rango (GI-3591) perteneciente a la Red Foral.

Con el objeto de emplear altas tasas de reciclado, se ha optado por la solución novedosa de fabricar una mezcla bituminosa templada con una tasa de reciclado del 80 %. El tipo de mezcla fue un AC 22 S (con un 20% de árido de aportación calizo), comúnmente empleado como capa intermedia tanto en obra nueva como en actuaciones de rehabilitación. Para ello, se ha rebajado a 100 °C la temperatura de fabricación de la mezcla, empleando una emulsión bituminosa fabricada por la empresa Cepsa, especialmente diseñada para esta técnica y para conseguir el mayor rejuvenecimiento del betún final, con un contenido medio del 60 % de ligante residual convencional.

La reducción de la temperatura de fabricación de la mezcla, desde los 160 – 170 °C de una mezcla convencional en caliente hasta los 100 °C de una mezcla templada, contribuye a la mejora de la eficiencia energética por el ahorro de combustible necesario para calentar la mezcla de áridos y ligante, reduce las emisiones contaminantes y mejora las condiciones de trabajo de los operarios. Los antecedentes de esta actuación en España, mediante el empleo de las técnicas templadas son escasos; se han podido encontrar ejemplos en las actuaciones realizadas en las obras de acondicionamiento de la A-1 en Burgos y un pequeño tramo de la GI-3333 "Al barrio de San Andrés y Urkiazelai (Placencia de las Armas)", realizado en el año 2011, con resultados satisfactorios.

Así mismo, el material se ha extendido a una temperatura comprendida entre 80 – 90 °C, en condiciones sensiblemente mejores que las que tiene lugar en el extendido de las mezclas bituminosas en caliente, empleando procedimientos idénticos a los de las mezclas bituminosas en caliente, sin que se hayan observado diferencias apreciables.

A continuación, en los siguientes apartados de esta comunicación se presentan los resultados obtenidos durante las distintas fases de ejecución de la obra, con el fin de evaluar las ventajas e inconvenientes de esta novedosa técnica, así como estudiar las propiedades de la mezcla bituminosa reciclada resultante tanto a nivel de laboratorio como a partir de testigos de obra.

2. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO, PREVIOS A LA EJECUCIÓN DE LA OBRA.

2.1 CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE FRESADO Y ÁRIDOS DE APORTACIÓN.

El material a reciclar, como ya se ha mencionado con anterioridad, procedió de la obra de rehabilitación del firme de la autovía N-I de la calzada sentido Irún-Vitoria entre las localidades de Idiazabal y Beasain. Los áridos que componían el material de fresado, eran de cantera y estaban constituidos por una mezcla de material calizo (capa inferior) y óftico (capa rodadura), envueltos por una película de betún envejecido.

Una vez transportado el material a reciclar a la planta asfáltica de la empresa Asfaltia s.l. ubicada en Iruña de Oca (Vitoria-Álava), se clasificó en tres fracciones distintas; 0/8 mm, 8/14 mm y 14/32 mm. Una imagen de la clasificadora utilizada aparece en la figura 1. Esta clasificación previa del material de fresado se considera parte fundamental del proceso ya que permite disponer de un material más homogéneo y así garantizar de algún modo la fabricación de la mezcla bituminosa templada reciclada diseñada.



Figura 1: Clasificación del material de fresado.

Durante la clasificación del material de fresado se tomaron muestras de las distintas fracciones para su caracterización, cuyos resultados se presentan en las tablas 1 y 2. Los ensayos realizados fueron:

- Granulometría del árido de cada fracción de fresado después de la extracción del ligante, según la norma UNE-EN 12697-2.
- Contenido de ligante soluble de cada fracción de fresado, según la norma UNE-EN 12697-1.
- Recuperación del ligante envejecido según la norma UNE-EN 12697-3.
- Penetración del ligante recuperado según la UNE-EN 1426.
- Punto de reblandecimiento del ligante recuperado según la UNE-EN 1427.

A partir de este tipo de mezcla, se llevó a cabo un análisis comparativo de distintas fórmulas de trabajo incluyendo diferentes tipos y porcentajes de zeolitas que permiten reducir la temperatura de fabricación de dicha mezcla bituminosa a través del método de espumación indirecta del betún. Así, se estudiaron: tres mezclas semicalientes (AC-Z1, AC-Z2 y AC-ZR) fabricadas mediante el uso de distintas cantidades de los diferentes tipos de zeolitas (Zeolita 1, Zeolita 2 y Zeolita de Referencia, respectivamente); y una mezcla convencional sin zeolitas (denominada como AC-R), fabricada a diferentes temperaturas, siendo utilizada como patrón para evaluar el efecto de las zeolitas en la respuesta mecánica de mezclas para su uso en firmes de carreteras.

Figura 1: Clasificación del material de fresado.

| | Fresado 0/8 (sin ligante) | Fresado 8/14 (sin ligante) | Fresado 14/32 (sin ligante) |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Tamiz UNE (mm) | % pasa | | |
| 32 | 100 | 100 | 100 |
| 22 | 100 | 100 | 100 |
| 16 | 100 | 100 | 91 |
| 8 | 99 | 58 | 57 |
| 2 | 58 | 27 | 33 |
| 0.5 | 27 | 16 | 19 |
| 0.25 | 20 | 12 | 15 |
| 0.063 | 10.2 | 5.2 | 8.6 |
| % Ligante s/m | 4.7 | 2.5 | 3.4 |

Tabla 2: Características de ligante envejecido recuperado.

| Recuperación del ligante envejecido para su caracterización (UNE-EN 12697-3) | |
|---|----|
| Penetración 25 °C, dmm | 11 |
| Pto. Reblandecimiento, A&B °C | 80 |

A destacar las características del ligante extraído que presentaba una penetración de 11 dmm y un punto de reblandecimiento de 80 °C para un contenido de ligante del material de fresado bruto (antes de ser fraccionado) de 4,3 % s/a. Todo ello nos indica que trabajaríamos con un ligante muy envejecido por el paso del tiempo.

Para la composición granulométrica de la mezcla se ha tenido en cuenta la granulometría en blanco del material de fresado, es decir sin ligante, debido a que se considera que se producirá un desmenuzamiento del material de fresado en el proceso de mezclado debido a que la temperatura de mezclado generalmente es superior al punto de reblandecimiento del ligante residual del material de fresado en al menos veinte grados, y a esto hay que añadirle la energía que aporta el propio proceso de mezclado.

Cómo áridos de aportación se han utilizado áridos gruesos de naturaleza caliza procedentes de la cantera de Nanclares de la Oca. Las fracciones utilizadas fueron dos: un 12/20 mm y un 20/40 mm. Las características de éste árido corrector son las que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3: Características de los áridos calizos de aportación.

| DESIGNACIÓN | ENSAYOS | NORMA UNE EN | Ud. | Resultado |
|--|--------------------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| ÁRIDO GRUESO 12/20 CALIZA | INDICE DE LAJAS (FORMA) | 933-3 | % | 10 |
| | RESISTENCIA A LA FRAGMENTACION | 1097-2 | - | 18 |
| | DENSIDAD APARENTE | 1097-6 | Mg/m ³ | 2,70 |
| | ABSORCION DE AGUA | 1097-6 | % | 0,61 |
| | CONTENIDO DE FINOS (LIMPIEZA) | 933-1 | % | 0,3 |
| ÁRIDO GRUESO 20/40 CALIZA | INDICE DE LAJAS (FORMA) | 933-3 | % | 0 |
| | RESISTENCIA A LA FRAGMENTACION | 1097-2 | - | 18 |
| | DENSIDAD APARENTE | 1097-6 | Mg/m ³ | 2,70 |
| | ABSORCION DE AGUA | 1097-6 | % | 0,48 |
| | CONTENIDO DE FINOS (LIMPIEZA) | 933-1 | % | 0,7 |

2.2 SELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA EMULSIÓN BITUMINOSA

La emulsión desarrollada por Cepsa para estas técnicas de reciclado es la denominada Reciemul CL-90 que corresponde con una emulsión catiónica de rotura lenta C60B6 REC que presenta las características indicadas en la tabla 4.

Con este tipo de emulsión Cepsa ha realizado diversas obras en España y Portugal por lo cual se tenía experiencia previa sobre su comportamiento.

Tabla 4. Características de la emulsión bituminosa.

| TIPO | ENSAYOS | NORMA UNE EN | Ud. | Resultado ensayo | |
|---|--|-------------------------|------------|-----------------------------|--|
| C60B6 REC Reciemul CL-2 90 | Índice de rotura | 13075-1 | - | 175 | |
| | Tiempo de fluencia 2mm, 40°C | 12846 | s | 61,7 | |
| | Contenido de ligante | 1428 | % | 61,7 | |
| | Tamizado 0.5 mm | 1429 | % | 0,01 | |
| | Tendencia a la sedimentación, 7 días | 12847 | % | <10 | |
| | Adhesividad | 13614 | % | >90 | |
| | Residuo por evaporación (UNE EN 13074) | | | | |
| | Penetración (25°C, 100g y 5s) | 1426 | 0,1 mm | <330 | |
| | Punto de reblandecimiento | 1427 | °C | >35 | |

2.3. ESTUDIO DE LA FÓRMULA DE TRABAJO.

El tipo de mezcla a diseñar fue un AC 22 S caliza para capa intermedia, con una tasa de reciclado del 80%. Debido a lo novedosa que es la técnica de reciclado con emulsión a baja temperatura, hoy en día no existe de momento una normativa específica para este tipo de mezclas, si bien existe una monografía desarrollada en la asociación ATEB con una serie de recomendaciones recabadas por la experiencia acumulada del sector.

En cuanto a la caracterización de las propiedades de la mezcla, nos encontramos con la mayor incógnita que tiene este tipo de mezclas templadas recicladas que es definir el mejor sistema de compactación y energía a utilizar para la obtención de probetas de laboratorio. Según bibliografía, parece que la mejor técnica de compactación debido a que refleja de manera más cercana lo que ocurre a escala real es la compactación mediante la máquina giratoria según la norma UNE-EN 12697-31, sin embargo, no está claramente definida la energía de compactación a utilizar.

Por todo ello, para la obtención de la fórmula de trabajo para esta obra nos hemos basado en la experiencia acumulada, tanto por Asfaltia como Cepsa, en obras similares y realizadas tanto en España como en Portugal. Esta experiencia en laboratorio se fundamenta en dos ensayos:

- Envueltas en laboratorio.
- Ensayo de inmersión-compresión. (NLT-162)

A partir de estos dos ensayos y variando el % de emulsión se estableció el contenido de emulsión óptimo en la mezcla. Mediante el ensayo de envuelta determinamos el grado de cobertura y manejabilidad de la mezcla con la incorporación de la emulsión. Con el ensayo de inmersión-compresión determinamos unas resistencias mecánicas y una resistencia a la acción del agua, así como una densidad de referencia. Estos fueron los parámetros de partida de la fórmula de trabajo que se complementaron con los ensayos exigidos en el pliego particular de la obra.

Para la realización de los ensayos complementarios se utilizó el método de compactación por impacto y posteriormente durante la ejecución de la obra se estudió el sistema de compactación con giratoria.

- Contenido de huecos, según la norma UNE-EN 12697-8.
- Ensayo en pista de laboratorio, según la norma UNE-EN 12697-22.

En cuanto a las condiciones de fabricación de la mezcla a nivel de laboratorio éstas fueron:

Temperatura del material de fresado y árido de aporte: 110 ± 5 °C

Temperatura de la emulsión: 60 ± 5 °C

Temperatura de la mezcla: 95 ± 5 °C

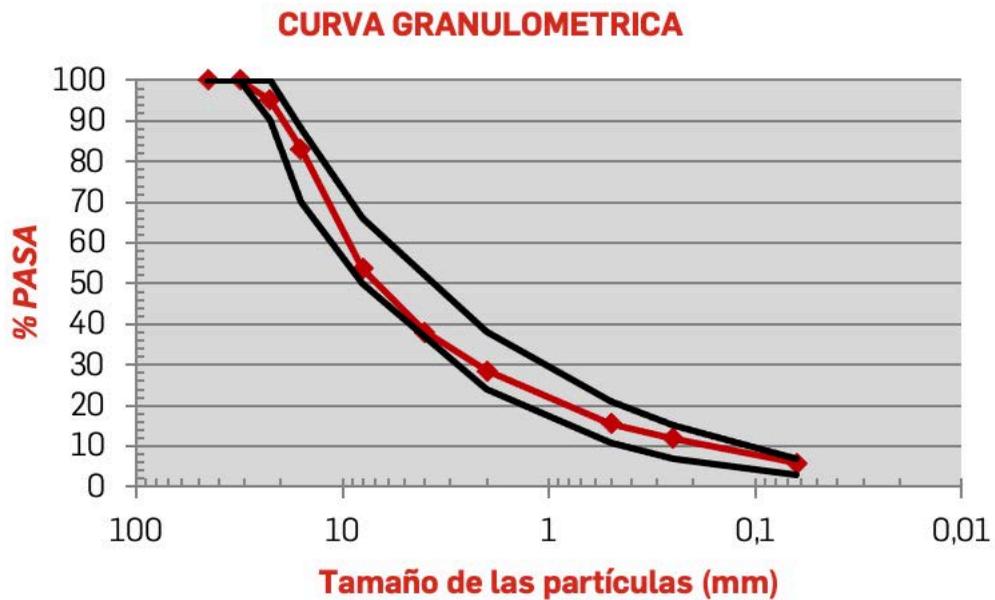
A continuación, en la tabla 5 se presenta la composición de la mezcla con sus distintos materiales constituyentes:

Tabla 5: Composición de la mezcla bituminosa reciclada con el 80% de material de fresado.

| FRACCIÓN ARIDO | % DOTACION (EN MASA S/A) |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Fresado 0/8 mm | 18 |
| Fresado 8/14 mm | 42 |
| Fresado 14/32 mm | 20 |
| Árido grueso caliza 12/20 mm | 10 |
| Árido grueso caliza 20/40 mm | 10 |
| % ligante viejo | 2.7 |
| % emulsión | 3.5 |
| % ligante final | 4.8±0.4 |

CURVA GRANULOMETRICA DE LA MEZCLA BITUMINOSA diseñada:

| | | | | | | | | |
|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Tamiz UNE | 32 | 22 | 16 | 8 | 2 | 0,5 | 0,25 | 0,063 |
| % PASA | 100±5 | 95±5 | 83±5 | 54±5 | 29±3 | 16±3 | 12±3 | 5,8±1.5 |
| Huso AC22S | 100 | 100 | 88 | 66 | 38 | 21 | 15 | 7 |
| | 100 | 90 | 70 | 50 | 24 | 11 | 7 | 3 |



Se han incluido las tolerancias permitidas para la granulometría y contenido de ligante según el PG-4, artículo 22 de mezclas recicladas en caliente, si tenemos en cuenta las tolerancias permitidas según la monografía de ATEB en el tamiz 0.063 mm ésta se dobla hasta un 3% y en el 0.25 mm se reduce hasta la mitad a un 1.5%.

CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS

Las probetas fueron fabricadas con el compactador de impactos (UNE-EN 12697-30) con una energía de compactación de 75 golpes por cara y a 90°C.

DENSIDAD APARENTE DE PROBETAS BITUMINOSAS (Método hidrostática) (UNE-EN 12697-6).
Densidad aparente media, s.s.s., Mg/m³: **2,361**

DENSIDAD MAXIMA (UNE-EN 12697-5)
Procedimiento A, Volumétrico en agua a 25°C
Densidad máxima, Mg/m³: **2,494**

CONTENIDO EN HUECOS EN LAS PROBETAS DE MEZCLA BITUMINOSA, (UNE-EN 12697-8).
Contenido en huecos en aire (V_m), %: **5,3**
Contenido de huecos de áridos (VMA), %: **14,5**

ENSAYO DE RODADURA

Las placas para el ensayo de rodadura se compactaron con el compactador de rodillo liso segmentado según la norma UNE-EN 12697-33. El dispositivo utilizado fue el pequeño aplicando el procedimiento en aire. La temperatura del ensayo fue de 60°C y el acondicionamiento de las probetas de 4 horas a la misma temperatura. El espesor de la probeta fabricada fue de 6 cm. Las probetas se fabricaron con un 4% s/a de emulsión (+0.5 % sobre el definido en la fórmula de trabajo).

Resultados del ensayo

| Característica | Unidad | 1 | 2 | Media |
|--|-------------------|----------|----------|--------------|
| Densidad aparente s.s.s. | Mg/m ³ | 2,390 | 2,392 | - |
| Pendiente de la rodada, WTS _{AIRE} (para 10 ³ ciclos de carga) | mm. | 0,11 | 0,10 | 0,1 |
| Profundidad proporcional del surco, PRD _{AIRE} | % | 7,9 | 7,5 | 7,7 |
| Profundidad del surco, RD _{AIRE} | mm. | 4,8 | 4,5 | 4,6 |

ADHESIVIDAD ARIDO-LIGANTE, mediante el ensayo de Inmersión-compresión (NLT-162) Las probetas se han fabricado por compresión simple a 6 toneladas y a 70 °C. Las condiciones de acondicionamiento de las probetas sumergidas en agua fueron de 24 h a 60 °C. Se realizaron dos ensayos a dos porcentajes de emulsión al 3,5% y al 3,0%. Los resultados se muestran a continuación:

| Descripción | Ud. | Probetas Secas | Probetas Húmedas |
|---|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| Ensayo con un contenido de emulsión del 3.5% s/a. | | | |
| Densidad aparente media (s.s.s.) | kg/m ³ | 2,372 | 2,380 |
| Resistencia a compresión (NLT-162): | MPa | 5,0 | 4,0 |
| Resistencia conservada: | % | 79 | |
| Ensayo con un contenido de emulsión del 3.0% s/a. | | | |
| Densidad aparente media (s.s.s.) | kg/m ³ | 2,359 | 2,355 |
| Resistencia a compresión simple (NLT-162): | MPa | 5,1 | 3,8 |
| Resistencia conservada: | % | 74 | |

MODULO DE RIGIDEZ (UNE-EN 12697-26, ANEXO C)

Las probetas se han fabricado mediante el compactador de impacto a 75 golpes por cara a 90 °C. El ensayo se ha realizado a 20°C.

| Densidad aparente Mg/m³ | Modulo (MPa) |
|---|---------------------|
| 2,375 | 4120 |

Estas serian las características de la mezcla AC 22 S R80 caliza diseñada, donde se puede comprobar que se cumplen las especificaciones requeridas como si se tratará de mezcla bituminosa en caliente para una carretera con una categoría de tráfico T3-T4.

3. FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

La mezcla bituminosa reciclada templada se fabricó en una planta asfáltica convencional discontinua INTRAME 260t ubicada en Iruña de Oca (Álava) propiedad de Asfaltia s.l. Una imagen de la misma se puede ver en la figura 2.



Figura 2: Planta Asfáltica INTRAME 260t

La fabricación, en cuanto a temperaturas de calentamiento de los materiales se siguió según el protocolo establecido en laboratorio con la única diferencia de que la fracción de material de fresado más fina se introdujo directamente al mezclador sin pasar por el tambor secador como si lo hizo el resto de fracciones, con el objetivo de minimizar el “pegado” del fresado en la planta. Aún así, como acción preventiva de posibles paradas por obstrucciones en planta de mayor consideración, se realizaron operaciones de limpieza cada 8 camiones suministrados a obra. Estas operaciones de limpieza consistieron básicamente en retirar parte de material de fresado que se había quedado pegado, tanto en la parte baja como en la superior del elevador. La temperatura de la mezcla durante la fabricación rondaba entre los 90-100 °C. El equipo de compactación utilizado fue el convencional como si se tratará de una mezcla asfáltica en caliente. Se utilizó un rodillo metálico vibrante y un compactador de neumáticos, estando la temperatura de mezcla, al inicio de la compactación entre 80-90°C.

4. RESULTADOS DEL CONTROL DE OBRA EN LABORATORIO

La obra se inició a finales del mes de julio de 2014 terminándose en el mes de septiembre, se fabricaron y extendieron algo más de 5000 t. El control de calidad realizado durante la fabricación y extendido de obra fue el siguiente:

Diariamente se tomaron muestras de planta (un total de 12) para la realización de ensayos básicos consistentes en determinar el contenido de ligante, granulometría, contenido de huecos y densidad.

Adicionalmente se tomaron 6 muestras en días alternos para la realización de ensayos complementarios que consistieron, además del ensayo básico comentado anteriormente, ensayos de sensibilidad al agua, ensayos de rodadura, inmersión-compresión, modulo de rigidez y características del ligante recuperado.

Para llevar a cabo el seguimiento de la obra finalizada, se decidió sacar una primera tanda de testigos en el mes de noviembre para posteriormente tras un determinado periodo prolongado de tiempo en servicio extraer una segunda tanda de testigos y ver el comportamiento de la mezcla.

Sobre esta primera tanda de testigos se realizaron los siguientes controles: grado de compactación, módulo de rigidez y sensibilidad al agua.

Elaboración de las probetas y densidad de referencia:

Como ya se ha adelantado con anterioridad, uno de los problemas que se tienen en el control de este tipo de mezclas recicladas templadas es concretar el tipo de compactación y energía más adecuado y en consecuencia definir la densidad y características de la mezcla. Si bien hasta ahora para los reciclados en frío y templados se consideraba como densidad de referencia la resultante de la compactación por el sistema de inmersión-compresión (compactada a 6t), ahora disponemos de más metodologías de compactación que habrá que considerar, como es el caso de la compactadora giratoria.

Por ello, durante el control de fabricación se estudiaron tres posibles metodologías de compactación: impacto, giratoria y compresión simple.

A continuación, en las tablas 6 a 14 se presentan todos los resultados obtenidos en el control de calidad durante la fase de fabricación de la mezcla bituminosa templada reciclada.

Granulometría y contenido de ligante residual.

Tabla 6.: Curva granulométrica media obtenido de las 12 muestras ensayadas.

| | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tamiz UNE | 32 | 22 | 16 | 8 | 2 | 0,5 | 0,25 | 0,063 |
| % PASA $\pm\sigma$ | 100\pm0 | 93\pm4 | 79\pm4 | 53\pm3 | 25\pm2 | 14\pm1 | 11\pm1 | 6.9\pm1.2 |
| Huso AC22S | 100 | 100 | 88 | 66 | 38 | 21 | 15 | 7 |
| | 100 | 90 | 70 | 50 | 24 | 11 | 7 | 3 |

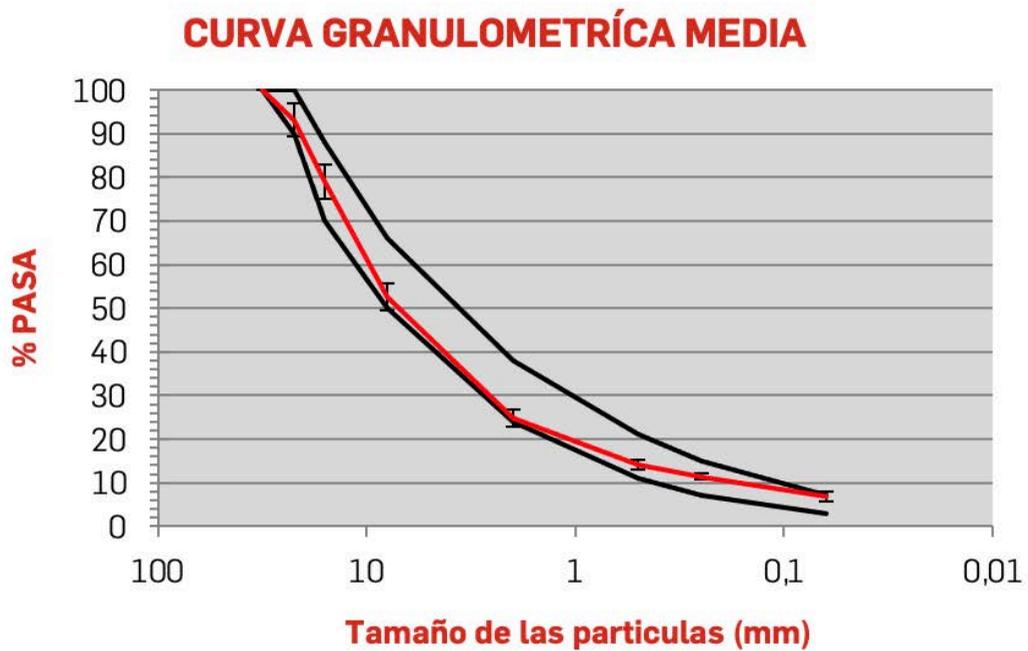


Tabla 7.: Contenido de ligante soluble en la mezcla.

| Nº de muestra | Contenido de ligante (%) s/m |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 4,2 |
| 2 | 4,2 |
| 3 | 4,8 |
| 4 | 4,1 |
| 5 | 4,8 |
| 6 | 4,9 |
| 7 | 5,5 |
| 8 | 5,1 |
| 9 | 4,5 |
| 10 | 4,7 |
| 11 | 4,6 |
| 12 | 4,5 |
| MEDIA$\pm\sigma$ | 4,9\pm0,4 |

Los resultados obtenidos en laboratorio durante el control de fabricación en cuanto a curvas granulométricas y dotación contenido de ligante residual muestran una dosificación correcta.

La caracterización del ligante recuperado es la siguiente:

Tabla 8.: Caracterización del ligante residual recuperado

| Nº de muestra | Característica | Resultado |
|----------------------|---|--------------------------|
| 1 | PENETRACIÓN, 25 °C. 0.1 mm | 29 |
| | PUNTO DE REBLANDECIMIENTO, °C | 65 |
| 11 | PENETRACIÓN, 25 °C. 0.1 mm | 27 |
| | PUNTO DE REBLANDECIMIENTO, °C | 66 |
| MEDIA | PENETRACIÓN, 25 °C. 0.1 mm PUNTO DE REBLANDECIMIENTO, °C | 28 65,5 |

Densidad máxima y densidades aparentes de probetas de laboratorio a partir de muestras de obra.

A continuación en las tablas 9 y 10 se presentan los resultados obtenidos de la densidad máxima y densidades aparentes obtenidas con distintos métodos de compactación y energías.

Tabla 9.: Densidad máxima de la mezcla. (UNE-EN 12697-5)

| Nº de muestra | Densidad máxima Mg/m³ |
|----------------------|---|
| 1 | 2,533 |
| 2 | 2,549 |
| 3 | 2,533 |
| 4 | 2,532 |
| 5 | 2,533 |
| 6 | 2,535 |
| 7 | 2,533 |
| 8 | 2,544 |
| 9 | 2,522 |
| 10 | 2,527 |
| 11 | 2,523 |
| 12 | 2,535 |
| MEDIA±σ | 2,533±0,008 |

Tabla 10.: Densidades aparentes de la mezcla por distintos métodos de compactación y energía (Temperatura de compactación 90°C, en todos los casos).

| Nº de muestra | Densidad aparente s.s.s. Mg/m ³ | | | |
|----------------|--|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | IMPACTO (75 golpes/cara) | IMPACTO (50 golpes/cara) | GIRATORIA (50 giros) | Compresión simple (6t) |
| 1 | 2,446 | 2,405 | 2,425 | 2,374 |
| 2 | 2,387 | - | - | - |
| 3 | 2,427 | - | - | - |
| 4 | 2,425 | 2,411 | 2,437 | - |
| 5 | 2,427 | 2,429 | - | - |
| 6 | 2,439 | 2,423 | - | - |
| 7 | 2,422 | 2,418 | - | - |
| 8 | 2,433 | - | - | - |
| 9 | 2,433 | - | - | - |
| 10 | 2,443 | - | - | - |
| 11 | 2,441 | 2,420 | 2,443 | 2,420 |
| 12 | 2,420 | - | - | - |
| MEDIA±σ | 2,428±0,016 | 2,418±0,008 | 2,435±0,009 | 2,397±0,033 |

Los resultados de la densidad máxima obtenidos en obra difieren con respecto a los obtenidos en la fórmula de trabajo, siendo algo mayores los obtenidos en obra. Esta variación se piensa que se debe a la posible dispersión en cuanto a la naturaleza del árido del material de fresado que como ya se ha indicado es una mezcla de árido calizo y óftico. Los valores de densidad máxima obtenidos en obra nos indican que posiblemente se traten de áridos de naturaleza óftica en su gran mayoría.

Los resultados de la tabla 10 nos muestran las variaciones en densidad según el método y energía de compactación utilizados. No se aprecian diferencias significativas entre los distintos sistemas de compactación a las energías seleccionadas si se tiene en cuenta la propia variabilidad del método de ensayo. Indicar que en el caso de la compactación a compresión simple se aprecia una menor densidad media que en el resto pero esto se puede deber a un menor número de ensayos. Más adelante, analizaremos estos resultados con los testigos extraídos de obra.

Si comparamos estas densidades aparentes de probetas a partir de muestras de obra con las obtenidas en la fórmula de trabajo, también se observan densidades en obra mayores, debido a la densidad de los áridos del material de fresado, como se ha indicado anteriormente.

Contenido de huecos

En la tabla 11 se muestran los resultados de los contenidos en huecos, considerando la densidad aparente de la probetas obtenidas por impacto a 75 golpes por cara.

Tabla 11.: Contenido de huecos en aire y áridos (UNE-EN 12697-8)

| Nº Muestra | Huecos en aire (%) | Huecos en árido (%) |
|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 3,4 | 13,4 |
| 2 | 6,4 | 16,1 |
| 3 | 4,2 | 15,5 |
| 4 | 4,2 | 13,9 |
| 5 | 4,2 | 15,5 |
| 6 | 3,8 | 15,4 |
| 7 | 4,4 | 17,3 |
| 8 | 4,4 | 16,4 |
| 9 | 3,5 | 14,2 |
| 10 | 3,3 | 14,5 |
| 11 | 3,3 | 14,0 |
| 12 | 4,5 | 15,1 |
| MEDIA$\pm\sigma$ | 4,1\pm0,8 | 15,1\pm1,2 |

Como se puede observar todos los contenidos de huecos en aire están por encima del 3% y los huecos de árido son superiores al 14%, salvo en la muestra número 1. La media estaría dentro de la especificación establecida para una mezcla AC 22 S en caliente.

Sensibilidad al agua

En la tabla 12 se presentan los resultados de sensibilidad al agua según la norma UNE-EN 12697-12, obtenidos por los tres métodos de compactación: impacto, giratoria e inmersión compresión. El ensayo se ha realizado a 15 °C. El acondicionamiento de las probetas sumergidas en agua fue de 3 días a 40 °C.

Tabla 12.: Sensibilidad al agua.

| Nº muestra | IMPACTO (50 golpes/cara) | | | GIRATORIA (50 giros) | | | Compresión simple (6t) | | |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | RTI seco (MPa) | RTI húmedo (MPa) | ITSR (%) | RTI seco (MPa) | RTI húmedo (MPa) | ITSR (%) | RTI seco (MPa) | RTI húmedo (MPa) | ITSR (%) |
| 1 | 1,39 | 1,24 | 89 | 1,86 | 1,52 | 82 | 4,3 | 2,97 | 70 |
| 4 | 1,73 | 1,66 | 96 | 1,67 | 1,42 | 85 | - | - | - |
| 5 | 2,02 | 1,83 | 90 | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 1,85 | 1,74 | 94 | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 1,93 | 1,77 | 92 | - | - | - | - | - | - |
| 11 | 1,99 | 1,59 | 80 | 2,2 | 1,99 | 90 | 3,7 | 3,0 | 81 |
| MEDIA$\pm\sigma$ | 1,82\pm0,23 | 1,64\pm0,21 | 90\pm6 | 1,91\pm0,3 | 1,64\pm0,3 | 86\pm4 | 4,0\pm0,4 | 3,0\pm0,02 | 76\pm7,8 |

Considerando de qué se trata de una mezcla para capa intermedia, y la especificación establecida para la resistencia conservada a tracción indirecta para este tipo de mezcla en caliente es de 80, observamos que se cumple dicha especificación tanto con el método de compactación por impacto como por la giratoria.

En cuanto al ensayo de inmersión-compresión se obtiene una resistencia conservada media superior al 75% con resistencias en seco y húmedo superiores a 2,5 MPa y 2,0 MPa, respectivamente.

Ensayo de rodadura

En la tabla 13 se presentan los resultados del ensayo de rodadura según la norma UNE-EN 12697-22.

Tabla 13.: Resultados del ensayo de rodadura

| N.º Muestra | Densidad aparente de las placas Mg/m³ | Pendiente de deformación, WTS aire (mm a 10³ciclos de carga) | Profundidad de la rodera, PRD (%) |
|--------------------|---|--|--|
| 1 | 2,421 | 0,06 | 4,9 |
| 4 | 2,452 | 0,04 | 3,9 |
| 11 | 2,460 | 0,1 | 6,4 |
| MEDIA±σ | 2,444±0,021 | 0,07±0,03 | 5,1±1,3 |

Los resultados obtenidos cumplen la especificación correspondiente al WTS para una mezcla AC 22S en caliente para un tráfico T3-T4 que debe ser igual o inferior a 0,1 mm a los 1.000 ciclos de carga.

Modulo de rigidez

En la tabla 14 se presentan los resultados del modulo de rigidez según la norma UNE-EN 12697-26 anexo C, a 20 °C. Las probetas se obtuvieron por impacto a 75 golpes por cara a 90 °C.

Tabla 14.: Resultados del modulo de rigidez a 20°C

| Nº Muestra | Densidad aparente Mg/m³ | Modulo (MPa) |
|-------------------|---|---------------------|
| 1 | 2,538 | 4075 |
| 4 | 2,416 | 2929 |
| 11 | 2,433 | 4153 |
| MEDIA±σ | 2,462±0,066 | 3719±685 |

Los resultados del módulo de rigidez son todos prácticamente superiores a 3000 MPa y muy parecidos a los obtenidos en el estudio de la formula de trabajo, salvo en el caso de la muestra 4. Podrían considerarse equivalentes a una mezcla en caliente tipo G o S.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LOS TESTIGOS EXTRAÍDOS DE OBRA.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre los testigos extraídos en obra en el mes de noviembre (tras un periodo en servicio de 2 meses). Se sacaron parejas de testigos por cada punto kilométrico haciendo un total de 24, a lo largo de toda la longitud de la obra (algo más de 4 km).

En las tablas 15 a 17 se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre los testigos de obra que éstos fueron: densidades aparentes y grado de compactación, sensibilidad al agua de 12 testigos y modulo de rigidez de otros 12 testigos.

Tabla 15: Densidades y grado de compactación de los testigos extraídos del firme.

| N.º testigo | PK. | Altura (mm) | densidad s.s.s. (Mg/m ³) | % compactación (D.ref. 2,428) Impacto (75x) | % compactación (D.ref. 2,435) Giratoria (50 g) | % compactación (D.ref. 2,397) Compresión simple (6t) |
|-------------|--------------|------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| 1 | 3+600 | 62,50 | 2,490 | 103% | 102% | 104% |
| 1' | | 65,70 | 2,490 | 103% | 102% | 104% |
| 2 | 4+025 | 60,70 | 2,478 | 102% | 102% | 103% |
| 2' | | 65,60 | 2,479 | 102% | 102% | 103% |
| 3 | 4+405 | 55,60 | 2,411 | 99% | 99% | 101% |
| 3' | | 53,50 | 2,365 | 97% | 97% | 99% |
| 4 | 4+815 | 63,00 | 2,402 | 99% | 99% | 100% |
| 4' | | 62,20 | 2,396 | 99% | 98% | 100% |
| 5 | 5+180 | 76,10 | 2,403 | 99% | 99% | 100% |
| 5' | | 79,70 | 2,436 | 100% | 100% | 102% |
| 6 | 5+565 | 58,90 | 2,352 | 97% | 97% | 98% |
| 6' | | 56,70 | 2,332 | 96% | 96% | 97% |
| 7 | 5+920 | 59,20 | 2,433 | 100% | 100% | 102% |
| 7' | | 57,70 | 2,431 | 100% | 100% | 101% |
| 8 | 6+370 | 52,30 | 2,396 | 99% | 98% | 100% |
| 8' | | 53,60 | 2,391 | 98% | 98% | 100% |
| 9 | 6+760 | 46,60 | 2,385 | 98% | 98% | 99% |
| 9' | | 50,20 | 2,334 | 96% | 96% | 97% |
| 10 | 7+120 | 40,30 | 2,387 | 98% | 98% | 100% |
| 10' | | 43,00 | 2,389 | 98% | 98% | 100% |
| 11 | 7+490 | 53,50 | 2,319 | 96% | 95% | 97% |
| 11' | | 57,20 | 2,317 | 95% | 95% | 97% |
| 12 | 7+925 | 48,70 | 2,344 | 97% | 96% | 98% |
| 12' | | 57,40 | 2,325 | 96% | 95% | 97% |
| | MEDIA | 57,50±9,1 | 2,395±0,054 | 99% | 98% | 104% |

En cuanto a las densidades obtenidas en obra se observan que éstas son inferiores a las densidades obtenidas en laboratorio por cualquiera de los tres métodos de compactación utilizados en laboratorio, exceptuando algunos testigos que dan grados de compactación superiores al 100%.

Además, cómo es lógico, dependiendo de la densidad de referencia que se tome, los grados de compactación varían (ver últimas 3 columnas de la tabla 15). El caso más desfavorable presenta 6 de 24 testigos (25%) con grados de compactación inferiores al 97%, que es el caso de la densidad de referencia obtenida con la compactadora giratoria. El caso más favorable sería utilizar la densidad de referencia por compresión simple donde el 100% de los testigos presentan un grado de compactación igual o superior al 97%.

Si tenemos en cuenta la densidad media de los testigos de obra, esta se parece más a la obtenida mediante la compactación por inmersión-compresión

Tabla 16. Módulo de rigidez (MPa)

| N.º | PK. | densidad s.s.s. (Mg/m³) | Modulo Rigidez (MPa) |
|------------|--------------|---|-----------------------------|
| 1 | 3+600 | 2,490 | 5.349 |
| 2 | 4+025 | 2,478 | 6.679 |
| 3 | 4+405 | 2,411 | 3.777 |
| 4' | 4+816 | 2,396 | 3.023 |
| 5 | 5+180 | 2,403 | 5.644 |
| 6 | 5+565 | 2,352 | 1.749 |
| 7 | 5+920 | 2,433 | 2.787 |
| 8' | 6+370 | 2,391 | 2.948 |
| 9' | 6+760 | 2,334 | 2.718 |
| 10' | 7+120 | 2,389 | 2.320 |
| 11' | 7+490 | 2,317 | 1.281 |
| 12' | 7+925 | 2,325 | 1.629 |
| | MEDIA | 2,393±0,056 | 3325±1715 |

En cuanto al modulo de rigidez se observa una gran dispersión, los valores de modulo varían desde 1.280 hasta 6.600 MPa, lo cual parece lógico teniendo en cuenta las dispersiones en densidad de los testigos y espesor de los mismos.

| Nº testigos | Sensibilidad al agua | | | | |
|--------------------------|---|---|----------------|------------------|----------|
| | Densidad media s.s.s. (Mg/m ³) seco | Densidad media s.s.s. (Mg/m ³) húmedo | RTI seco (MPa) | RTI húmedo (MPa) | ITSR (%) |
| 4, 5', 6'- 12, 2', 3' | 2,390 | 2,396 | 1,7 | 1,6 | 90 |
| 10, 1, 11'- 7', 8, 9 | 2,399 | 2,404 | 1,68 | 1,6 | 95 |

En cuanto a la sensibilidad al agua a partir de los testigos de obra se observa que las resistencias conservadas están muy por encima del 80%. Si nos fijamos en las resistencias en seco, estas son algo inferiores respecto a las de seco de probetas fabricadas en laboratorio a partir de muestras de obra, sin embargo la media de las de húmedo son del mismo orden.

A la vista de todos los resultados obtenidos hasta el momento en la ejecución y control de la obra es de destacar el buen comportamiento observado en la mezcla en las distintas fases del proceso.

Las dispersiones obtenidas en los resultados, lógicas por trabajar con alta tasa de fresado, están minimizadas por haber clasificado previamente el fresado en fracciones. Aun así las características finales obtenidas son muy similares a su equivalente en caliente.

6. CONCLUSIONES

A continuación se extraen las conclusiones más importantes sobre nuestra experiencia trabajando con mezclas bituminosas templadas con alta tasa de material de fresado tanto a nivel de laboratorio como durante la ejecución de la obra:

- El comportamiento en obra se ha considerado satisfactorio tras más de medio de año de puesta en servicio, actuando como rodadura durante este tiempo. El aspecto es similar al de una mezcla semidensa en caliente, no apreciándose descarnaduras ni defectos visuales.
- El análisis de los resultados nos da idea de lo difícil que es obtener resultados homogéneos a la hora de trabajar con fresados, aun teniendo los máximos cuidados en su fraccionamiento y manipulación en obra.
- Aunque los resultados de obra fueron correctos, surgieron los problemas típicos de utilizar esta técnica en una planta convencional, principalmente atascos en el elevador y suciedad en los filtros de mangas. Por ello, es necesario una adaptación adecuada de la planta o la utilización de un menor porcentaje de fresado.
- En cuanto al método de compactación más adecuado, a través de este estudio no se llega a una conclusión clara, pero lo que sí que parece claro es que, la energía de compactación necesaria para este tipo de mezclas templadas recicladas con alta tasa, al menos con la compactadora giratoria, es menor que para el caso de sus mezclas equivalentes en caliente.
- No está de más destacar las indudables ventajas que ofrece este tipo de técnica tanto de tipo ambiental como económica; las primeras se podrían cuantificar a partir del análisis del ciclo de vida, en cuanto a la económica una estimación a tenor de la evaluación específica que se ha realizado para esta obra, resultan un 20 - 25 % más económicas que sus correspondientes mezclas convencionales en caliente siempre y cuando el material de fresado se encuentre seleccionado y acopiado y las plantas adaptadas para este tipo de técnicas.
- En cuanto a las ventajas ambientales de este tipo de mezclas éstas son obvias, por un lado está la reutilización del material procedente del fresado que se origina en obras de rehabilitación de firme, evitando así llevarlo a vertedero y reduciendo el consumo de ligante bituminoso y áridos procedentes de las canteras. Por otro lado, está la ventaja de utilizar este tipo de tecnología de baja temperatura que permite trabajar a temperaturas de unos 100 °C e inferiores con las ventajas económicas de un menor consumo energético, en consecuencia menores emisiones y mayor salubridad para los operarios de obra.
- Por último, resaltar la necesidad de seguir trabajando con esta técnica ya que quedan aspectos por desarrollar, tales como fijar las condiciones en las que se debe realizar el acopio del material de fresado cuando no se emplea en la propia obra de rehabilitación, establecer un pliego de especificaciones que deben cumplir estas mezclas, profundizar en la puesta en obra, etc..., pero los resultados provisionales con los que se cuentan indican que estas mezclas templadas pueden resultar adecuadas para su empleo en actuaciones de rehabilitación o construcción de firmes de carreteras de intensidad media – baja, que corresponden a categorías de tráfico de T 2 a T 4, que suponen más del 50 % de la longitud del conjunto de la Red Foral de Carreteras del País Vasco.



Cepsa Comercial Petróleo S.A.U.
Paseo de la Castellana 259A · 28046 Madrid (España)
Teléfono Atención al Cliente: +34 91 337 75 55
www.cepsa.com