

Sostenibilidad en la construcción de carreteras en el siglo XXI. Proyecto EMULCELL: un ejemplo práctico de aplicación

Francisco Javier Prego Martínez⁽¹⁾; Ignacio Pérez Pérez⁽²⁾; Ana M^a Rodríguez Pasandín⁽³⁾ ; Alberto Miguéns Blanco⁽⁴⁾

(1) *Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable de los Dptos. de I+D+i de MISTURAS, S.A. y EXTRACO, S.A. Ourense. España*
Grupo de Geotecnologías Aplicadas (GEOTECH)-Universidad de Vigo (UVigo).
Pontevedra, España

(2) *Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Titular E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.*
Grupo de Carreteras, Geotecnia y Materiales. Universidade da Coruña (UDC)
A Coruña, España

(3) *Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesora Titular E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.*
Grupo de Carreteras, Geotecnia y Materiales. Universidade da Coruña (UDC)
A Coruña, España

(4) *Ingeniero Químico. Responsable de Línea de Construcción Sostenible. Área de Materiales Avanzados. Centro Tecnológico de Investigación Multisectorial (CETIM). Culleredo (A Coruña), España*

i-d-i@misturas.es

Palabras clave: Carreteras; sostenibilidad; emulsiones bituminosas; nanocelulosa; gravaemulsión.

RESUMEN: Esta comunicación presenta un breve resumen de la introducción de prácticas sostenibles en la ejecución de infraestructuras del transporte, en particular en la construcción de carreteras. Se muestran estrategias empresariales para implementar los nuevos paradigmas requeridos por la sociedad y se resumen los objetivos y principales resultados de **EMULCELL**, proyecto de I+D+i que ha desarrollado nuevos tipos de emulsiones bituminosas aditivadas con nanocelulosa, posteriormente empleadas en el diseño y fabricación de mezclas bituminosas en frío con mejor desempeño ambiental. Las mezclas se han validado experimentalmente, construyendo **Misturas, S.A.** un tramo de prueba, con el apoyo de **CETIM** y del **Grupo de Carreteras, Geotecnia y Materiales** de la Universidade da Coruña (UDC) como subcontratas tecnológicas.

1. Introducción. Búsqueda de materiales más sostenibles en la construcción de infraestructuras del transporte: una visión general.

La construcción de infraestructuras del transporte en general, y de carreteras en particular, requiere del consumo de gran cantidad de materiales, de muy diversa naturaleza: destacan los **materiales granulares** (suelos, áridos, etc.) y los que tienen capacidad **aglomerante** (conglomerantes hidráulicos, ligantes bituminosos, etc.). La producción y consumo racional de estos recursos es un aspecto fundamental para contribuir al desarrollo sostenible del sector de la construcción y fomentar el bienestar futuro de la sociedad, que cada vez es más exigente con los requisitos medioambientales que le pide a los productos en uso, y en todo lo referente a la protección de la naturaleza.

La incorporación de **residuos de diversos orígenes** en la construcción de carreteras se ha investigado mucho en los últimos años, con el fin de avanzar hacia un desarrollo sostenible, reutilizando y valorizando este tipo de productos, cuya gestión puede generar problemas medioambientales muy graves, con consecuencias nefastas para la flora, la fauna y para el propio ser humano.

Los diferentes residuos estudiados hasta la fecha para su uso en la construcción de carreteras han sido numerosos y variados. Destaca especialmente el análisis de los **Residuos de Construcción y Demolición (RCD)** procedentes de las propias obras de construcción de infraestructuras, edificaciones de nueva planta y demoliciones asociadas a esta actividad, (**Agreda et al.** [1]; **Barbudo et al.** [2]; **Poon et al.** [3]), campo en el que se ha avanzado mucho y que ha supuesto un hito importante para la incorporación sistemática de la circularidad en la industria de la construcción.

Otro caso destacado en la construcción de firmes son las **mezclas bituminosas**, cuyo reciclado se contempla en la normativa técnica del antiguo **Ministerio de Fomento** ([4, 5] ahora Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, MITMA), que está todavía en vigor. Otro residuo de gran impacto contemplado en la normativa española de carreteras es la incorporación de **polvo de caucho** procedente de neumáticos fuera de uso

(NFU) a las mezclas bituminosas, a través de betunes modificados que actúan como ligantes en las capas de firmes (**Ministerio de Fomento** [6]).

La incorporación de nuevos materiales a la industria de la construcción se está también fomentando en sectores afines, como es el **ferroviario**: la **Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española (PTFE)** publicó a principios de 2022 un documento que resume las tendencias de búsqueda de materiales más eficientes, duraderos y sostenibles en el sector del ferrocarril en España en los últimos años, con contribuciones muy interesantes en el ámbito de las aleaciones, *composites*, pinturas y elementos de mantenimiento de vía y del material rodante (**VV.AA.** [7]).

2015 supuso un hito internacional importante en lo que concierne a la sostenibilidad ambiental, al adoptar la **Organización de las Naciones Unidas (ONU)** sus **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**. Este hecho demuestra la importancia y alcance mundial de los nuevos paradigmas que se están introduciendo en la sociedad: se propuso una agenda global muy ambiciosa, aprobada por la comunidad internacional, para movilizar la acción colectiva entorno a objetivos comunes que posibiliten un desarrollo más justo y equitativo. Además de luchar contra la pobreza extrema, los ODS de la ONU integran y equilibran tres dimensiones esenciales en el desarrollo sostenible, como son las vertientes económica, social y **ambiental**, proporcionando una hoja de ruta para articular políticas mundiales encaminadas a lograr los 17 objetivos postulados por la ONU (**Gómez-Gil** [8]).



Figura 1: **Objetivos de Desarrollo Sostenible** adoptados por la ONU en 2015.

(Fuente: ONU. Consultado en www.un.org)

A pesar de los avances producidos en España en el sexenio 2015-2021, la **Fundación COTEC** destaca que nuestro país no adoptó una estrategia nacional propia (denominada “**España Circular 2030**”) hasta mediados del año 2020, con cierto retraso en comparación con otros estados de la UE. En la actualidad, el “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia” (PRTR) del Gobierno de España prevé que un 40 % de los fondos europeos de recuperación post-pandemia COVID se destinen específicamente a la denominada “Transformación Verde” (**VV.AA.** [9]).

Además de las iniciativas desarrolladas por los estados y su administración, es fundamental la **implicación de las empresas y organizaciones privadas** a la hora de introducir, implementar y perfeccionar prácticas de sostenibilidad y mejora ambiental en sus respectivas actividades, en particular en el mundo de la construcción de obra civil y edificación: el desarrollo del “negocio verde” también necesita del apoyo institucional, tanto desde el punto de vista económico como normativo, y presenta importantes obstáculos, no exentos de riesgos (**Sagaydack et al.** [10]).

Las iniciativas y avances comentados en este apartado denotan el cada vez **mayor interés de la sociedad por preservar y mejorar las condiciones medioambientales** en las que se desarrolla la actividad socio-económica: se trata de un cambio de paradigma que, sin duda, va a dejar huella en las técnicas y procesos de construcción empleadas en la ejecución de las obras de ingeniería civil y, probablemente, en la **historia de las vías de comunicación**. El tiempo será el encargado de confirmar (o no) esta aseveración.

2. Estrategias empresariales para afrontar los nuevos paradigmas.

La incorporación de **criterios medioambientales y de sostenibilidad** en la actividad diaria de las empresas privadas es en la actualidad casi una obligación, siendo un imponderable en el **sector de la construcción**. Este hecho se puede abordar desde diferentes perspectivas, que se comentan de manera resumida en este apartado.

Por un lado, está la posibilidad de incorporar **sistemas de gestión específicos** dentro de la organización, que sean verificados y auditados por entidades externas. Además de ya la clásica certificación empresarial según el referencial

UNE EN-ISO 14001 (estándar internacional para **Sistemas de Gestión Ambiental** ([AENOR](#) [11])), en los últimos años han aparecido nuevas normativas, más especializadas y encaminadas a la incorporación y refuerzo de los criterios ambientales en el ámbito empresarial, como son el **cálculo de la huella de carbono** y la verificación y control de los **gases de efecto invernadero** (GEI) ([AENOR](#) [12]), ambos de aplicación en la industria de la construcción. Por ejemplo, en las plantas de producción de cementos y en la fabricación de mezclas asfálticas, en sus diferentes variedades.

Otra estrategia empresarial habitual es la puesta en marcha de **proyectos específicos para la mejora medioambiental** y la incorporación de la circularidad en la empresa constructora. Podríamos hacer aquí una distinción entre los **proyectos industriales** más o menos convencionales (a desarrollar a través de los Dptos. de Producción), y los **proyectos de I+D+i** que tengan entre sus objetivos optimizar el desempeño medioambiental de la organización, a través de la investigación y el desarrollo de técnicas y procedimientos novedosos, respecto de las actividades habitualmente establecidas. Esta última opción es también susceptible de certificarse por parte de terceros, a través de diferentes estándares con mucho recorrido en nuestro país ([AENOR](#) [13, 14]).

Es precisamente esta última opción la que da origen a esta comunicación: se presenta en los apartados que siguen un resumen del **proyecto de I+D+i EMULCELL**, liderado por la constructora ourensana **Misturas, S.A.** como parte de su estrategia de medio ambiente y sostenibilidad, aplicada en la construcción de carreteras e infraestructuras del transporte.

3. El proyecto EMULCELL. Origen y presentación de la idea.

“EMULCELL: Desarrollo de nuevas emulsiones bituminosas mediante el uso de nanocelulosas, para la obtención de mezclas asfálticas en frío mejoradas y medioambientalmente sostenibles” es un proyecto de I+D+i realizado entre 2017 y 2021 por la empresa constructora **Misturas, S.A.** con el apoyo del **Grupo de Carreteras, Geotecnia y Materiales (CGM)** de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña (UDC) y el **Centro Tecnológico de Investigación Multisectorial (CETIM)**, a través de su Área de Materiales Avanzados.

Se trata de una iniciativa innovadora en la que se investigó el uso de **distintos tipos de nanocelulosas como emulgentes para la estabilización de mezclas bituminosas en frío**, con la finalidad de disminuir su coste de fabricación y minimizar los impactos ambientales asociados a la construcción de carreteras con este tipo de mezclas.

Se eligieron las **mezclas bituminosas en frío (MBF)** para la investigación porque se trata de un material de construcción con un **desempeño medioambiental más eficiente que las mezclas bituminosas en caliente (MBC)** en la construcción de carreteras: aun así, no hay que perder de vista que las prestaciones mecánicas y resistentes de las MBF son peores que las de las MBC, siendo las MBC las tradicionalmente más empleadas en la construcción de carreteras en España. Si bien las MBF han tenido mucha menos aplicación en nuestro país, sus características (como veremos a continuación) las convierten en un material de construcción con mucho potencial de uso en el futuro inmediato.

De forma simplificada, para un lector no experto en firmes, se puede decir que las MBF son el resultado de mezclar una emulsión bituminosa (betún asfáltico + agua) con áridos de diferentes granulometrías, a temperatura ambiente: tras el proceso de mezclado, y una vez colocadas en obra (mediante su extendido y compactación), las MBF necesitan un tiempo mínimo (denominado “tiempo de maduración”) para desarrollar unas resistencias adecuadas para el paso de los vehículos por la vía.

Por su parte, las MBC están constituidas por un betún asfáltico (que actúa como ligante bituminoso) y áridos de diferentes tamaños, que necesitan de la aplicación de energía calorífica en su producción: una parte del calor se emplea en el secado de los áridos y otra se usa para que el ligante adquiriera la viscosidad necesaria para la incorporación de los áridos a la mezcla, que se produce en el mezclador de la planta de fabricación de firmes.

Ambos tipos de mezclas (MBF y MBC) contienen en sus formulaciones **betunes y otros productos derivados del petróleo**, en general contaminantes y caros, pero que en las MBF están presentes en una proporción menor. Las MBF no necesitan de grandes aportes de energía en su

fabricación porque se hacen a temperatura ambiente, y las condiciones de producción son más sencillas. Por todo ello, **el impacto ambiental de las MBF es sensiblemente menor que el de las MBC.**

En la Figura 2 se muestra una comparativa básica entre los dos tipos de mezclas bituminosas (MBF y MBC): Las MBF presentan, de manera global, un comportamiento medioambiental más eficiente que las MBC.

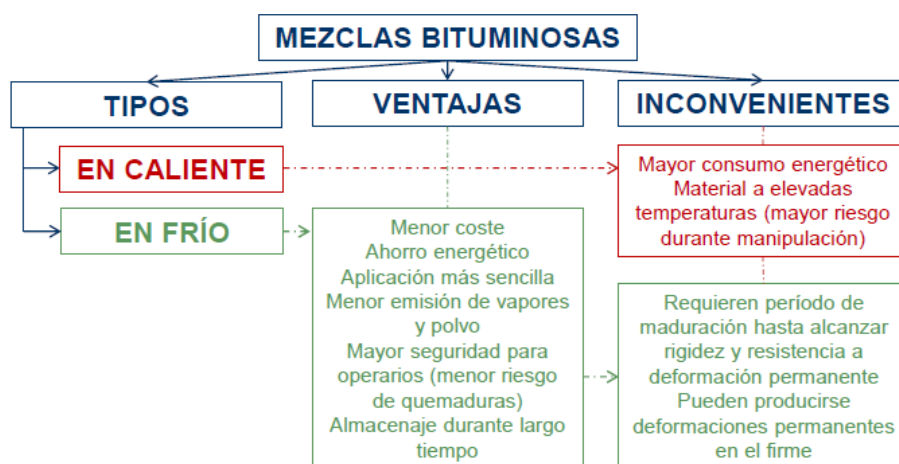


Figura 2: Comparativa entre mezclas bituminosas en caliente (MBC) y mezclas bituminosas en frío (MBF). (Fuente: Los autores)

4. Estrategias desarrolladas en EMULCELL. Empleo de nanocelulosa en firmes.

El proyecto EMULCELL apuesta por fabricar MBF más eficientes desde el punto de vista económico y ambiental, empleando novedosas emulsiones bituminosas en las que se reduce la cantidad de betún presente en la emulsión, sustituyéndolo por **nanocelulosa**.

Una **emulsión bituminosa** es una dispersión de betún en agua, donde la fase continua es el agua y la discontinua la constituyen pequeñas partículas de betún. Para facilitar la dispersión del betún en el agua y conseguir que la emulsión sea estable, se emplean unas sustancias denominadas emulsionantes, que poseen una parte apolar con gran afinidad con el betún y otra apolar que tiene afinidad con el agua. Esta doble característica química les permite situarse en la interfase betún-agua, evitando de este modo la coalescencia de los glóbulos de betún en la emulsión, dando a las emulsiones las características físico-químicas necesarias para fabricar una MBF.

Las emulsiones bituminosas se utilizan fundamentalmente para la generación de las MBF, las cuales presentan, como se introducía en el apartado previo, las siguientes ventajas respecto de las MBC:

- Menor coste de fabricación, debido al ahorro energético derivado de su producción.
- Fabricación y puesta en obra a temperatura ambiente, que hace que su aplicación sea más sencilla. Ello implica también una menor emisión de vapores y polvo, y una mayor seguridad para los operarios, al minimizarse el riesgo de quemaduras e inhalación de gases tóxicos.
- Posibilidades de almacenaje durante largos períodos de tiempo, una característica que no poseen las MBC, ya que deben ponerse en obra antes de que enfríen (pues pierden sus propiedades reológicas).

Por su parte, la nanocelulosa es un producto de origen natural, derivado de la **celulosa**. La celulosa es uno de los polímeros naturales más abundantes, que está formado por más de 3000 unidades de glucosa y constituye la unidad básica estructural de las plantas y la materia vegetal en general. Con el nacimiento de la nanotecnología, se ha desarrollado la **nanocelulosa** (NC), un material de nuevo cuño que se ha convertido en una materia prima muy prometedora, debido a sus múltiples aplicaciones en campos tan amplios como el *packaging*, construcción, ingeniería, medicina, farmacia y cosmética, entre otras industrias.

Desde el punto de vista estructural, la nanocelulosa está constituida por regiones cristalinas de celulosa, conectadas entre sí mediante celulosa amorfa para formar micro o macro fibras, como se observa en la Figura 3. Sus propiedades dependen de su cristalinidad, morfología y del tamaño de las fibras de las nanopartículas. Posee gran área superficial, alta reactividad, firmeza, hidrofiliidad, quiralidad y ligereza, lo que la convierte en una **materia prima idónea para una gran variedad de aplicaciones industriales** y con un alto valor añadido ([Ruiz Palomero et al. \[15\]](#)).

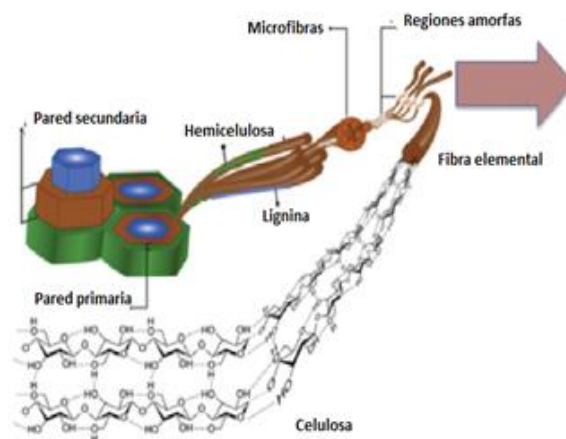


Figura 3: Proceso de obtención de **nanopartículas de celulosa** a partir de materia vegetal (Fuente: [Salas et al. \[16\]](#)).

La combinación de estas propiedades con una producción rápida y económica de la nanocelulosa convierten a esta nanopartícula en un material de características tan novedosas como las del grafeno; por ello, los expertos en nanotecnología le auguran un futuro muy prometedor ([Salas et al. \[16\]](#)).

Existe en la naturaleza **gran variedad de fuentes de celulosa** y **diversos procedimientos para la obtención de nanocelulosa** a partir de la primera. De manera no exhaustiva, las nanopartículas de celulosa se suelen dividir en tres grupos: nanofibras de celulosa (NFC), nanocristales de celulosa (NCC) y nanocelulosa bacteriana (BNC), como se recoge en la Figura 4:

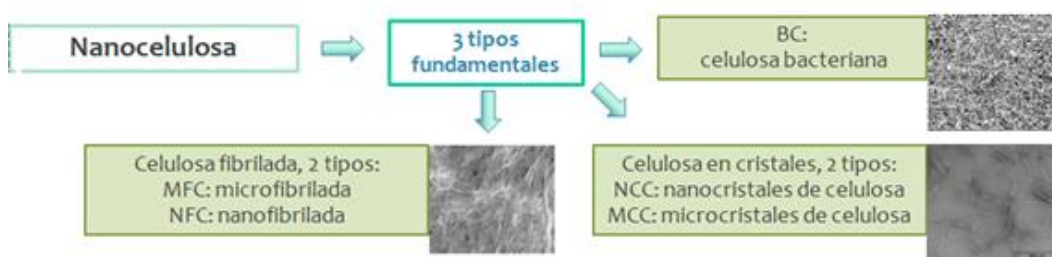


Figura 4: Principales tipos de nanocelulosas (Fuente: CETIM. Área de Materiales Avanzados).

De los tres tipos de nanocelulosa citados, en el transcurso del proyecto EMULCELL se constató que la más adecuada para su empleo en este tipo de firmes (MBF) era la **nanocelulosa en cristales (NCC)**, comercializada en España a través de empresas especializadas en materiales avanzados y biotecnología. En este proyecto, la NCC fue comprada a ENSO *Innovation*

Environmental Solution, firma de base tecnológica con sede en Culleredo (A Coruña).

A continuación, se resumen las principales actividades del proyecto, encaminadas a la **obtención de nuevas emulsiones aditivadas con nanocelulosa**, que luego **se incorporaron a la fabricación de las MBF**, las cuales se pusieron en obra para su validación a escala real, en un prototipo-demostrador.

5. Nuevos tipos de emulsiones y mezclas bituminosas en frío (MBF) desarrolladas en EMULCELL.

En la primera fase del proyecto se fabricaron **emulsiones bituminosas con emulgentes convencionales**, que sirvieron como patrones de referencia, ajustando parámetros de dosificación de cara a la posterior incorporación de la **nanocelulosa en cristales (NCC)** en su composición.

Las primeras emulsiones experimentales resultaron ser estables, aniónicas y con un índice de rotura muy bajo, lo que obligó a poner en práctica otros procedimientos de dosificación: se modificaron las nanocelulosas de base y se realizaron nuevas pruebas de fabricación con otros tipos de nanocelulosas, para mejorar sus prestaciones, en cuanto a **polaridad** y **rotura** (separación de fases): las emulsiones experimentales deben ser catiónicas y tener un índice de rotura alto para poder incorporarse al proceso de fabricación de las MBF.

Finalmente se obtuvo una **emulsión bituminosa aditivada con nanocelulosa**, denominada “eNanocell 07”, adecuada para la producción de MBF, en concreto para **gravaemulsiones (GE)**.

| CARACTERÍSTICAS | ESPECIFICACIONES |
|--|------------------|
| Polaridad de las partículas | Positivo |
| Índice de rotura (filler Forshammer) | > 170 |
| Contenido en ligante recuperado | ≥ 58 % |
| Contenido en fluidificante por destilación | ≤ 2.0 % |
| Tendencia a la sedimentación | ≤ 10 % |

Tabla 1: Principales característica de la **emulsión experimental “e-Nanocell 07”**

(Fuente: Los autores)

Una vez desarrollada la emulsión experimental más conveniente para los objetivos de EMULCELL, se procedió a la **fabricación de la MBF a escala industrial**, una **grava-emulsión tipo GE-01**: en concreto, se fabricó una **GE convencional** (o de control) y otra **GE experimental**, incorporando la emulsión “e-Nanocell07” a su fórmula de trabajo, En esta fase del proyecto se empleó una **planta móvil** de Fabremasa, modelo MZF-3, propiedad de **Misturas, S.A.** ubicada en Allariz (Ourense), como se muestra en las figuras que siguen.



Figura 5: Vista general de la planta de fabricación de MBF de **Misturas, S.A.** (arriba) y producción de la MBF tipo GE-01 a escala industrial (abajo).

6. Demostrador a escala real construido por Misturas, S.A. en Allariz (Ourense).

6.1 Diseño del tramo de prueba-prototipo.

Para definir la **estructura del firme** del prototipo experimental (número de capas y espesores de cada una) fue necesario conocer la **capacidad portante del suelo** sobre el que se iba a construir el prototipo y escoger el **tipo de tráfico** para el cual se diseñaba. Con estos valores, se recurrió a la normativa técnica de referencia para el diseño de la sección tipo de un firme en España:

el PG-3 (**Ministerio de Fomento** [17]) y las recomendaciones de la **Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB** [18]).

| SECCIONES DE NUEVA CONSTRUCCIÓN PARA TRÁFICO T31 | | | | | | | | | |
|--|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| Sección nº:→ Material: ↓ | Ref. 3111 | ATEB 311-1 | ATEB 311-2 | Ref. 3121 | ATEB 312-1 | ATEB 312-2 | Ref. 3131 | ATEB 313-1 | ATEB 313-2 |
| Mezcla bitum. caliente | 20 | 6 | 12 | 16 | 6 | 10 | 16 | 6 | 12 |
| Lechada bituminosa | | | | | | | | | |
| Mezcla bitum. en frío | | | | | | | | | |
| Grava-emulsión | | 20 | 12 | | 18 | 12 | | 20 | 12 |
| Zahorra Artificial | 40 | 20 | 20 | 40 | 25 | 25 | 25 | | |
| Zahorra Natural | | 20 | 20 | | | | | | |
| Explanada: | E1 | | | E2 | | | E3 | | |

Tabla 2: **Secciones tipo** recomendadas por la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosa [18] para la construcción de MBF para tráfico tipo T31.



Figura 6: Medición del módulo de compresibilidad con el **ensayo de carga con placa**, para determinar la **capacidad portante del suelo**: en este caso se trata de una explanada E1 (superior a 60 MPa; **Ministerio de Fomento** [5]).

Para un suelo de tipo “tolerable”, con una categoría de explanada E1 (según la Instrucción 6.1-IC, **Ministerio de Fomento** [5]) y una categoría de tráfico pesado T3 (aquel que tiene una Intensidad Media Diaria –IMD- de entre 100 y 200 vehículos pesados, **Ministerio de Fomento** [5]), se eligió una sección tipo **ATEB 311-2** (Ver las Tablas 2 y 3).

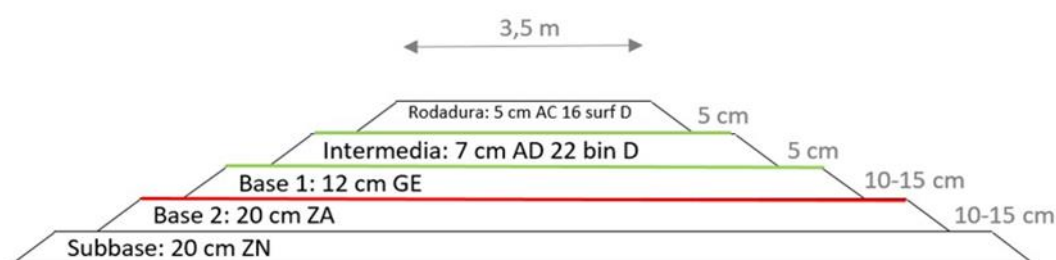
| |
|-------------------|
| 12 cm de MBC |
| 12 cm de GE |
| 20 cm de ZA |
| 20 cm de ZN (***) |

Tabla 3: **Sección tipo teórica**, indicando capas, materiales y espesores (en cm). De abajo hacia arriba: zahorra natural (ZN), zahorra artificial (ZA), gravaemulsión (GE) y mezcla bituminosa en caliente en la capa de rodadura (MBC).

Una vez realizado el diseño teórico de la sección tipo, ésta se adecuó a las características de la zona de construcción y a los medios disponibles para su ejecución, en cuanto a espesores y longitud del tramo de prueba.

Para comparar el comportamiento de la **mezcla bituminosa en frío (MBF) experimental** (gravaemulsión tipo **GE-1 aditivada con nanocelulosa**) con una **GE convencional de control**, se construyó un tramo-prototipo de 50 m de longitud y 3.5 m de ancho, subdividido a su vez en 2 partes diferenciadas:

- Un **primer subtramo** de 25 m de longitud, donde la capa de base 1 es una **GE-1 experimental**, aditivada con nanocelulosa.
- Un **segundo subtramo de 25 m** de longitud, donde la capa de base 1 está constituida por **GE-1 convencional**, de control.



Explanada E1

Imprimación —

Adherencia —

Figura 7: **Sección real** del prototipo-demostrador: La GE experimental se sitúa en la **capa “base 1”** (la tercera contada desde la explanada hacia arriba).

Como se observa en la Figura 7, las capas intermedia y superior (capa de rodadura) del demostrador se construyeron empleando MBC, como es habitual en la práctica en nuestro país: se recurrió a una mezcla tipo AD 22 bin D en la capa intermedia (antiguas mezclas D20) y a una mezcla AC 16 surf D en la rodadura (antiguamente denominada D12). La suma de ambos espesores (7 y 5 cm, respectivamente) da los 12 cm de MBC indicados en la Tabla 3.

6.2 Construcción del tramo de prueba.

En este apartado se muestra el **proceso de ejecución del tramo de prueba-prototipo** construido en la fase final del proyecto EMULCELL.

El proceso constructivo seguido, de abajo hacia arriba, fue el siguiente:

- Se acondicionó la **explanada natural**, colocando posteriormente la **capa de subbase y la base 2**.



Figura 8: Colocación de la **capa de subbase** (foto superior) y de la **base**, constituídas por zahorras. La foto inferior muestra el proceso de compactación de las capas empleando un rodillo metálico.

- La siguiente capa en colocarse fue la **gravaemulsión (GE-01)**, a modo de **capa de base 1**, que se dividió en dos partes: un subtramo de 25 m de longitud de GE convencional, y otro subtramo de 25 m, construido con GE fabricada con emulsión aditivada con nanocelulosa.



Figura 9: Trasvase de la GE desde un camión-volquete hasta la extendedora (foto superior) y proceso de puesta en obra de la **capa de base 1** (foto del medio e inferior).



Figura 10: Compactación de la **capa de base 1** empleando un rodillo metálico.

- Por último, se pusieron en obra las **capas intermedia y de rodadura**, constituidas por las MBC citadas (D20 y D12), que también fueron convenientemente compactadas y separadas con la colocación de un **riego de adherencia** entre ellas, según el diseño del tramo (ver el esquema de la Figura 7).



Figura 11: Colocación de la **capa intermedia** (MBC tipo AC 22 bin D).



Figura 12: Extendido de la **capa de rodadura** (MBC tipo AC 16 Surf D).



Figura 13: **Vista general** del tramo de prueba-prototipo una vez **finalizado**.

7. Análisis de resultados.

Una vez rematadas las actividades previstas (proceso de diseño y fabricación de la emulsión bituminosa experimental aditivada con nanocelulosa; diseño y fabricación de una MBF con dicha emulsión (gravaemulsión tipo GE-01) y puesta en obra a escala real de estos productos), se realizó una **campana de recogida de muestras** y fabricación de probetas experimentales durante la construcción del demostrador: su finalidad fue establecer una comparativa entre el desempeño de la GE experimental desarrollada en EMULCELL y la GE convencional, tomada como elemento de control.

Las diferentes series de probetas fueron sometidas a ensayos de **inmersión-compresión** y de **rotura a compresión**, comparando resultados de los productos convencionales con los experimentales.



Figura 14. **Probetas experimentales** sometidas a inmersión.

La **GE convencional** empleada como patrón de comparación se sometió a diversos ensayos de caracterización, obteniendo los siguientes resultados:

- Su esqueleto mineral **encaja dentro del huso granulométrico** teórico para este tipo de mezclas.
- **Contenido de ligante: 3,2 %** (cumple la prescripción de ATEB para este tipo de productos [18]).
- **Resistencia a compresión simple: 2,86 MPa**
- **Apto para tráfico tipo T3** (incluso T2).
- **Resistencia ensayo de inmersión-compresión: 2,08 MPa**

Por su parte, la **GE experimental** (fabricada con emulsión bituminosa aditivada con nanocelulosa) fue sometida a los mismos ensayos, obteniendo los siguientes resultados:

- El esqueleto mineral queda **fuera del huso granulométrico**, pero en **valores admisibles** (por un exceso de áridos finos).
- **Contenido de ligante: 4,3 %** (cumple la prescripción de ATEB).
- **Resistencia a compresión simple: 4,39 MPa**
- **Apto para paso de tráfico tipo T3** (incluso T2).
- **Resistencia ensayo inmersión-compresión: 2,94 MPa**

Los resultados experimentales obtenidos reflejan que la GE experimental fabricada con emulsión aditivada con nanocelulosa es **comparable a la convencional**, alcanzando en algún caso valores característicos que mejoran al producto convencional: por ejemplo, en la resistencia tras el ensayo de inmersión-compresión.

8. Conclusiones.

En este artículo se han presentado algunos de los retos medioambientales a los que se enfrenta el mundo de la construcción de infraestructuras y, en particular, de carreteras. Se citan estrategias para la incorporación de la sostenibilidad en esta actividad económica y se presenta el proyecto de I+D+i **EMULCELL** como caso práctico de aplicación: se fabricaron nuevos tipos de MBF que emplean emulsiones bituminosas aditivadas con nanocelulosa, un producto de origen vegetal que permite disminuir el uso de los derivados del petróleo en este material de construcción.

Este ejemplo real demuestra que el proceso de fabricación de este tipo de MBF (gravaemulsiones aditivadas con nanocelulosa) es **posible técnicamente**, ya que:

- Es factible la fabricación en laboratorio de emulsiones con nanocelulosa, tras diversos procesos de ajuste de polaridad y estabilidad.
- A nivel industrial, ha resultado **factible** la fabricación de emulsiones aditivadas con nanocelulosa. Y además se puede emplear una instalación convencional, tanto en la fabricación de las emulsiones como en la fabricación de la MBF (gravaemulsión tipo GE-01).
- Las GE experimentales han demostrado obtener unas prestaciones similares o incluso superiores a las convencionales, rebajando el uso de derivados del petróleo en su fabricación.

Los resultados obtenidos abren un camino en la búsqueda de **nuevos materiales que mejoren la sostenibilidad de la industria de la construcción**, un paradigma que muy probablemente marque la historia futura de las infraestructuras del transporte.

9. Bibliografía.

[1] **Agrela, F.; Barbudo, A.; Ramírez, A.; Ayuso, J.; Carvajal, M.D.; Jiménez, J.R.** *Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Málaga, Spain*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 58, pp. 98-106 (2012), ISSN: 0921-3449

[2] **Barbudo, A.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Jiménez, J.R.; Poon, C.S.** *Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications*. Construction and Building Materials. Vol 28, pp. 129-138 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035>

[3] **Poon, C.S.; Chan, D.** *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base*. Construction and Building Materials 20 (8), pp. 578-585 (2006)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>

[4] **Ministerio de Fomento**. “*Orden Circular 8/2001, de 27 de diciembre, de Reciclado de firmes*”. Madrid (2001).(Publicada una 2ª edición revisada y corregida en diciembre de 2003)

[5] **Ministerio de Fomento**. “*Norma 6.3-IC “Rehabilitación de firmes”*”. Orden Ministerial (BOE de 12-12-2003). Madrid (2003)

[6] **Ministerio de Fomento**. “*Orden Circular 24/08 sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG.3)*”. Artículos: 542-Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminosas y 543-Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. Madrid (2008)

[7] **VV.AA.** *Research and innovation in advanced materials with application to the railway sector*. Spanish Railways Technological Platform (Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española). Ministerio de Ciencia e Innovación. Agencia Estatal de Investigación (AEI). Madrid (2022)

[8] **Gómez-Gil, C.** *Objetivos de Desarrollo Sostenible: una revisión crítica*. Papeles de Relaciones Ecosociales y Cambio Global. Nº 140, 2017/18, pp. 107-118

[9] **VV.AA.** *Informe COTEC: Situación y evolución de la Economía Circular en España*. Fundación COTEC para la Innovación. Madrid (2021)

[10] **Sagaydack, J.; Kharchenko, T.; Kendus, D.; Proshchalykina, A.; Hrabar, M.** *Development of Green Bussiness in the EU: Obstacles and State support*. International Journal of Environmental Science. Volume 6, 2021 (ISSN: 2367-894)

[11] **AENOR**. *UNE-EN ISO 14001:2015. Sistemas de gestión ambiental*. Requisitos con orientación para su uso (ISO 14001:2015). Madrid (2015)

[12] **AENOR**. *UNE-EN ISO 14067:2019. Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para la cuantificación*. (ISO 14067:2018). Madrid (2019)

[13] **AENOR**. *UNE 166002:2021. Gestión de la I+D+i: Requisitos del Sistema de Gestión de la I+D+i*. Madrid (2021)

PREGO MARTÍNEZ, F.J. et alii. Sostenibilidad en la construcción de carreteras en el siglo XXI. Proyecto EMULCELL: un ejemplo práctico de aplicación.

[14] **AENOR**. UNE 166001:2006. *Gestión de la I+D+i: Requisitos de un proyecto de I+D+i*. Madrid (2015)

[15] **Ruiz Palomero et al.** *Nanocellulose as analyte and analytical tool: Opportunities and challenges*. Trends in Analytical Chemistry 87 (2017) 1-18

[16] **Salas et al.** *Nanocellulose properties and application in colloids and interfaces*, Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2014; 19 383-396

[17] **Ministerio de Fomento**. *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*. Madrid, 2019.

[18] **Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB)**. *Monografías. Gravaemulsiones*. Madrid, 2008.

10. Agradecimientos.

Los autores agradecen al **Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI)**, organismo dependiente del **Ministerio de Ciencia e Innovación-Gobierno de España**, el apoyo recibido para el desarrollo del proyecto de I+D+i **EMULCELL**, en la modalidad PID (**Ref. IDI-20171097**) de proyectos nacionales.

Así mismo, agradecen el apoyo de la constructora ourensana **Misturas, S.A.**, el **Grupo de Carreteras, Geotecnia y Materiales (GCGM)** de la Universidad da Coruña (UDC) y el **Área de Materiales Avanzados** del **Centro Tecnológico de Investigación Multisectorial (CETIM)**.



Este proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), dentro del Programa Operativo de Crecimiento Inteligente 2014-2020, con el objetivo de potenciar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación

MISTURAS OBRAS E PROXECTOS S.A.

EMULCELL: "Desarrollo de nuevas emulsiones bituminosas mediante uso de nanocelulosa para obtención de mezclas asfálticas en frío mejoradas y sostenibles"

Una manera de hacer Europa



UNIÓN EUROPEA



@CDTIoficial