CATÁLOGO DE RESIDUOS UTILIZABLES EN CONSTRUCCIÓN

CEDEX







NEUMÁTICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL (NFVU)





GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
CEDEX

ÍNDICE GENERAL

1. ORIGEN 1

2. VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO [2, 3, 4] 2

3. VALORIZACIÓN[2 A 6] 3

3.1 PROPIEDADES[2, 7] 5

3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS [2, 3, 4. 7, 9] 6
3.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS [1, 7, 9] 6
3.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS [7,9] 7

3.2 PROCESAMIENTO O TRANSFORMACIÓN [2, 3, 14, 7, 8,] 7

3.2.1 OBTENCIÓN DEL POLVO DE CAUCHO DE NFVU 8

3.3 PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO [16, 38, 92] 10

3.4 APLICACIONES 11

3.4.1 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA [1, 2, 3 A 5, 19, 39, 40] 11
3.4.2 OBRAS DE TIERRA Y TERRAPLENES[1, 2, 5,, 41, A 57] 13
3.4.3 CARRETERAS [13] 14
3.4.4 EDIFICACIÓN Y OBRA PÚBLICA [3, 4, 59, 61, 62] 16
3.4.5 OTRAS APLICACIONES [3, 4, 34, 63 A 70,] 17

3.5 OBRAS REALIZADAS 18

4. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES 21

4.1 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL 24

5. LEGISLACIÓN 25

6. NORMATIVA TÉCNICA 25

7. REFERENCIAS: 26

8. ENTIDADES DE CONTACTO 33

AGRADECIMIENTOS 33

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- CANTIDADES DE NFU RECOGIDAS EN LA UNIÓN EUROPEA 2

FIGURA 2.- RECOGIDA PORCENTUAL MEDIA DE NFVU POR SIGNUS Y TNU PARA EL AÑO 2023 (ELABORACIÓN PROPIA) 2

FIGURA 3.- FLUJO DE RECICLADO Y VALORIZACIÓN DE LOS NFU (GENTILEZA DE SIGNUS) 4

FIGURA 4. UBICACIÓN DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DE NFU (GENTILEZA DE TNU) 9

FIGURA 5. DETALLE DE LA UBICACIÓN DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DE NFU (GENTILEZA DE TNU) 9

FIGURA 6. LOCALIZACIÓN DE LAS CEMENTERAS ESPAÑOLAS QUE USAN NFVU COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO 12

FIGURA 7.- LIMITACIONES DE USO DEL GRANULADO Y POLVO DE CAUCHO SEGÚN LA ORDEN TED/1522/2021 23

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPOSICIÓN MEDIA DE LOS NEUMÁTICOS USADOS [TOMADO DE PÉREZ Y SAIZ (2018)[7]] 5

TABLA 2. TRAMOS DE “VÍA HÚMEDA” CON BETÚN FABRICADO EN CENTRAL DE BETUNES 19

TABLA 3. TRAMOS DE “VÍA HÚMEDA” FABRICANDO EL LIGANTE EN EL LUGAR DE EMPLEO 19

TABLA 4. TRAMOS DE “VÍA SECA” CONSTRUIDOS HASTA EL AÑO 2007 20

1. ORIGEN



NFVU enteros



NFVU triturado



NFVU granulado

Los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) se definen[1] como "neumáticos que ya no son adecuados para su propósito original". Se dividen en 6 categorías, donde se incluyen a los neumáticos procedentes de moto, scooter y ciclomotor (A), turismo (B), camioneta, SUV, 4x4, Todo Terreno (C), camión y autobús (D), quart, jardinería, manutención (E), agrícola (F), obra pública e industrial (G).

Los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) están clasificados como residuos no peligrosos con código LER 160103.

[1] UNE EN 14243-1

2. VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO [2, 3, 4]

Según las últimas estadísticas (año 2021) de ETRMA[2] (European Tyre & Rubber Manufacturers Association), la recogida y tratamiento de los NFU está en consonancia con años anteriores con más de 3 millones de toneladas para toda la Unión Europea, y con más de 255.000 toneladas en España (Figura 1).

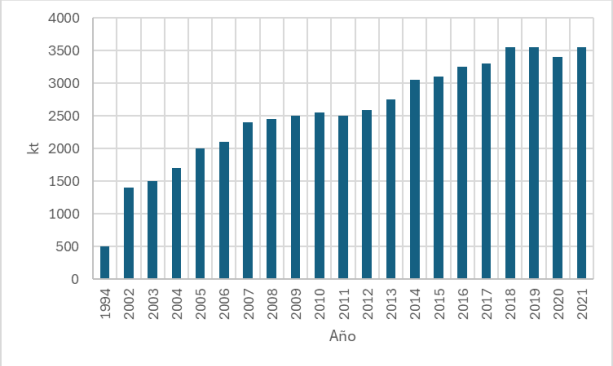


Figura 1.- Cantidades de NFU recogidas en la Unión Europea

Por su parte, SIGNUS[3] (Sistema colectivo de responsabilidad ampliada del productor de NFVU), que engloba a los principales fabricantes de neumáticos, indica que en el año 2023 se han gestionado 205.826 toneladas de NFVU, a los que hay que añadir las 93.633 toneladas gestionadas por TNU[4] (Tratamiento Neumáticos Usados, S.L.). La distribución porcentual de recogida para el año 2023 se muestra en la Figura 2 (ver memorias anuales de ambas entidades para mayor información).

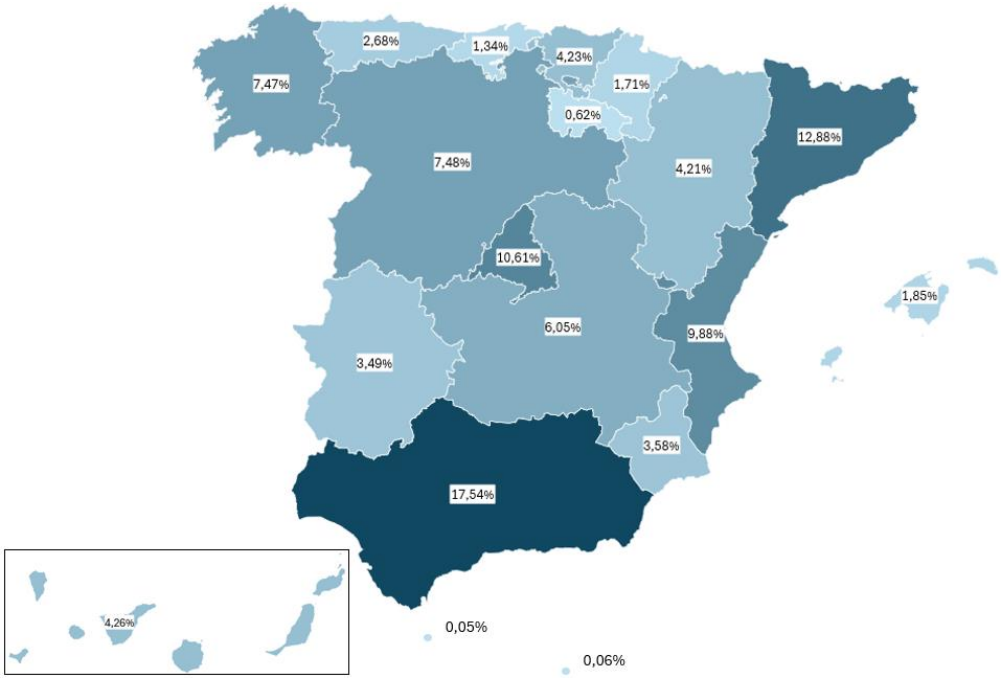


Figura 2.- Recogida porcentual media de NFVU por SIGNUS y TNU para el año 2023 (elaboración propia)

3. VALORIZACIÓN[2 A 6]

Se ha aprobado el Real Decreto 712/2025, que deroga el RD 1619/2005 y su modificación por el RD 731/2020. El nuevo texto refuerza la jerarquía de residuos en la gestión de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU), priorizando la reutilización, el recauchutado y el reciclado, y dejando la valorización energética como opción solo cuando no exista alternativa.

Introduce nuevas definiciones para clarificar el destino de los NFVU: un neumático reutilizable no puede enviarse a vertedero ni triturarse; si es recauchutable, debe destinarse preferentemente al recauchutado; y si es reciclable, debe dirigirse a reciclaje material.

El RD prohíbe expresamente el abandono, depósito incontrolado o vertido en vertedero de neumáticos, salvo usos muy específicos en ingeniería de vertederos. También impide su incineración cuando puedan reutilizarse o reciclarse. Finalmente, se establecen nuevas condiciones de almacenamiento seguro, con un límite máximo de dos años en instalaciones autorizadas.

Los NFVU están compuestos por tres principales componentes, caucho, acero y textil. La valorización de este residuo está directamente relacionada con su composición, siendo los procesos de valorización más habituales para los NFVU los indicados a continuación:

- Preparación para la reutilización (recauchutado, neumático de segunda mano)
- Valorización material
- Valorización energética

En la Unión Europea, en el año 2021 se han recogido y tratado para su valorización el 95%[2] de los NFVU generados. De ellos, el 55% se destina a valorización material, el 42% a la obtención de energía y el 3% a obras de ingeniería civil y relleno.

En el caso concreto de España, los datos aportados por SIGNUS y TNU[3] indican que, como datos medios, el 49,5% de los NFVU se valorizan para obtener nuevos materiales, un 38,0% se dedican a la valorización energética y un 11,4% se destinan a preparación para la reutilización.

El hecho que no se disponga del dato de preparación para la reutilización a nivel europeo puede deberse a dos factores:

1. Algunos países no consideran la preparación para la reutilización parte del tratamiento de residuos si los neumáticos aún se consideran productos y no residuos.
2. Otros, sin embargo, agrupan el dato dentro de la valorización material

En España, por otro lado, tanto SIGNUS como TNU, han optado por separar el dato diferenciando la valorización material de la preparación para la reutilización.

En la Figura 3 se incluye un esquema del flujo de los NFVU con su reciclado y valorización.

[2] https://www.etrma.org/key-topics/circular-economy/

[3] https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgecocir/neumáticos/250304%20Sistema%20información%20neumáticos%202023.pdf

Los neumáticos de segunda mano junto a los que son recauchutados son reintroducidos en el mercado para su venta. La Cátedra de la Universidad Miguel Hernández de Elche para la "Investigación y Formación sobre Neumáticos Reciclados", creada en 2011, publicó en junio de 2013 un estudio en el que se demuestra que el recauchutado de un NFVU supone un ahorro energético frente a la producción de uno nuevo de hasta el 70% si corresponde a un vehículo comercial, o de hasta el 45% si es de tipo turismo, así como una disminución del coste asociado y de los niveles de CO_2 emitidos (31 y 52 kg CO_2, respectivamente).

Los NFVU que no pueden ser reutilizados, se trituran para su posterior valorización material o energética. Este proceso de trituración mecánica (proceso más habitual) puede ser por molienda ambiental o criogénica. El objetivo es obtener un tamaño adecuado en función del destino final o tipo de valorización a realizar. Los productos obtenidos[4] tras este proceso son:

- Corte: con tamaños de 300 mm o superiores.
- Triturado: con tamaño comprendido entre 20 mm y 400 mm.
- Chip: con tamaño comprendido entre 10 mm y 50 mm.
- Granulados: con tamaño comprendido entre 0,8 mm y 20 mm.
- Polvo: con tamaño inferior a 0,8 mm.

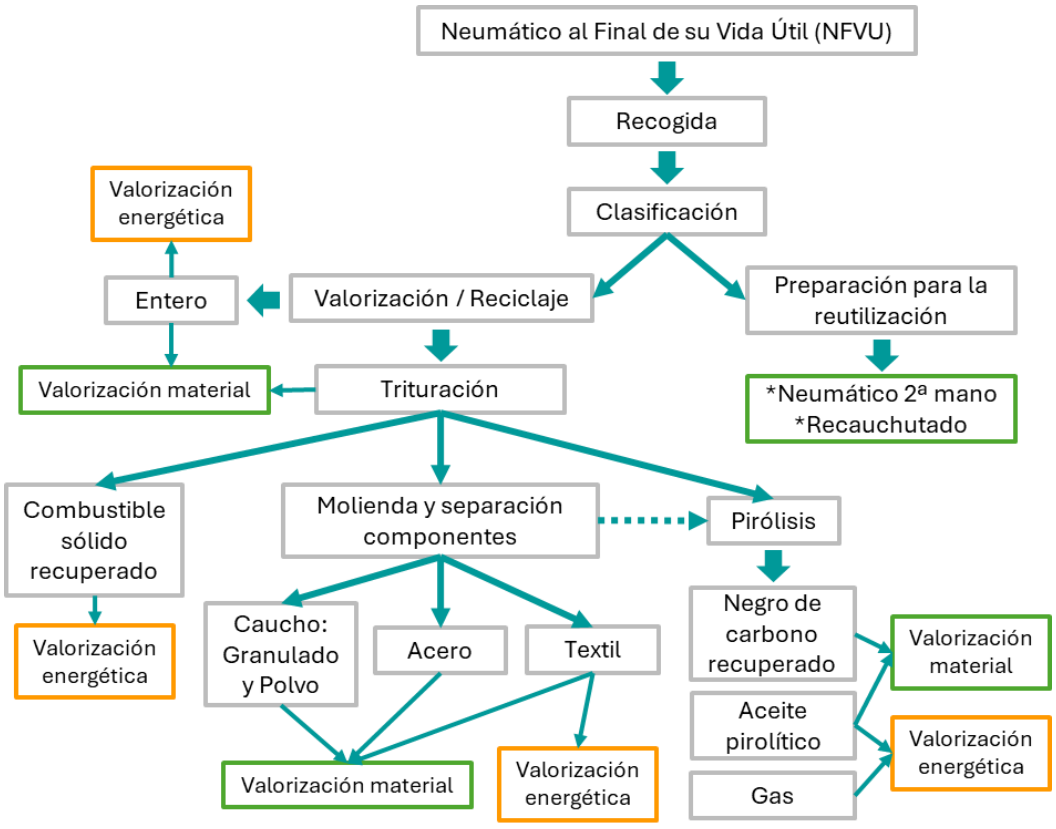


Figura 3.- Flujo de reciclado y valorización de los NFU (gentileza de SIGNUS)

[4] UNE EN 14243-1

La valorización material incluye el empleo de caucho de NFVU reducido a tamaños de granulado o polvo para su uso en la fabricación de relleno de césped artificial, bases elásticas, superficies de parques infantiles, superficies deportivas, paneles de aislamiento, o mezclas bituminosas modificadas. También puede emplearse en mezclas con caucho virgen o incluso con termoplásticos (elastómeros termoplásticos). Es interesante destacar el documento "Guía para el empleo de caucho reciclado procedente del neumático en la industria del caucho"[6] como herramienta para el empleo del caucho reciclado de NFVU en la industria del caucho.

También se contempla el uso de los NFVU en obra civil (muros, rellenos, etc.). Por otro lado, es posible valorizar el acero en aplicaciones industriales o de construcción.

La valorización energética, considerada como tercera opción, consiste en usar los neumáticos triturados (fragmentos, chip) como fuente de energía en los hornos de fabricación de Clinker e industrias del acero, dado su elevado poder calorífico (34-39 MJ/kg)[5]. También se están desarrollando nuevas tecnologías como la pirólisis que consiste en un proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno donde se obtienen tres fracciones: una fracción sólida que se trata de negro de carbono recuperado, un fracción líquida o aceite pirolítico y una fracción gaseosa que se recircula en el proceso para recuperar la energía.

3.1 PROPIEDADES[2, 7]

Las materias primas que se emplean para fabricar un neumático son caucho, negro de carbono y sílice, filamentos metálicos (alambres de acero), fibra textil, aditivos químicos, óxido de cinc y azufre. No obstante, la composición de los neumáticos puede variar de un continente a otro. En la Tabla 1 se muestran los componentes más habituales de los NFVU en la UE.

Tabla 1. Composición media de los neumáticos usados [tomado de Pérez y Saiz (2018)[7]]

Componente	Neumático de turismo (% en peso)	Neumático de camión (% en peso)
Caucho/Elastómeros	43	42
Negro de Carbono y Sílice	28	24
Acero	13	25
Textil	5	-
Óxido de zinc	2	2
Azufre	1	1
Acelerantes/Antioxidantes	2,5	2,2
Ácido esteárico	1	0,7
Aceites	7	1,6

Tal y como puede apreciarse, el componente que se encuentra en mayor proporción en los NFVU es el caucho, que se compone en este caso de una mezcla de caucho natural y cauchos sintéticos tales como los polímeros denominados SBR (*Stire Butadine Ruber o caucho de estireno*

butadieno) y BR (*Butadine Ruber* o *caucho de butadieno*). La relación entre estos tipos de caucho varía en función del uso que se le pretenda dar al neumático.

El negro de carbono y la sílice se incorpora en proporciones variables en la fabricación de las distintas partes de los neumáticos, consiguiéndose variaciones en la rigidez y en la resistencia a tracción y abrasión. Los componentes metálicos del neumático proporcionan a su carcasa rigidez, resistencia y flexibilidad, y constituyen un cordaje ligero de acero de alta resistencia. Los materiales textiles habitualmente utilizados en las carcasas de los neumáticos son el nylon, rayón y el poliéster.

Durante la mezcla de materias primas para la fabricación del neumático se añaden al caucho y al negro de carbono una serie de aditivos como cargas, plastificantes, estabilizantes, agentes colorantes, acelerantes y retardantes. La misión de estos aditivos es modificar la dureza y resistencia del caucho e incrementar su resistencia a la abrasión, aceites, oxigeno, disolventes químicos y al calor.

El azufre se aporta para el proceso de vulcanización, combinándose a temperaturas entre 120º y 160º con el caucho, lo que hace a este más resistente y elástico, contribuyendo a mejorar la durabilidad del neumático.

3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS [2, 3, 4. 7, 9]

El peso de los neumáticos varía entre 6,5 – 13 kg para los utilizados en automóviles de turismo y los 50 -80 kg en camiones.

La densidad aparente de un NFVU entero es de 100-120 kg/m^3, mientras que su peso específico de las partículas sólidas está en torno a 1,12-1,22 [5].

La capacidad de absorción de agua de un NFVU troceado varía entre un 2% y un 4%[8] y elevándose hasta el 7% en el estudio de San Martín (2009)[9]. Esta propiedad depende del tamaño del troceado de NFVU.

El poder calorífico de los NFVU en su forma de chip está entre 34,4 y 37,6 MJ/kg[6], y en su forma triturada entre 25 y 31 MJ/kg[7], valor superior incluso al de la antracita.

Los NFVU tienen una temperatura de autocombustión aproximada de 400ºC.

3.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS [1, 7, 9]

En general, los neumáticos contienen una mezcla de 63 compuestos químicos diferentes que se agrupan fundamentalmente en hidrocarburos, minerales y metales. Dentro de los hidrocarburos se pueden encontrar los polímeros más comunes utilizados en su fabricación, tales como el estireno-butadieno, poli isopreno y polibutadieno, o como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), fenoles y ácido esteárico, entre otros.

[5] UNE-EN 17189

[6] Valores obtenidos en ensayos por SIGNUS

[7] Valores obtenidos en ensayos por SIGNUS

Los minerales contenidos en los NFVU son principalmente el óxido de cinc, el azufre, el negro de carbono y la sílice (20-30% en combustión incompleta de hidrocarburos) y otros compuestos metálicos. Debido a sus propiedades antioxidantes y antiozonantes, el negro de carbono reduce el envejecimiento del caucho reciclado, como, por ejemplo, el polvo de neumáticos utilizado en ligantes bituminosos.

La composición elemental de los neumáticos está formada principalmente por C (80-90%), H (7,2-7,6%), O (2,3-3,1%) y S (1,4-2,4%). A excepción del cinc, la presencia de metales pesados es inferior al 0,1% en peso.

Entre las características químicas propias de los NFVU está la gran durabilidad a la exposición a agentes climatológicos, como altas y bajas temperaturas, humedad, radiación solar, rayos ultravioletas. Asimismo, no son biodegradables ni tóxicos.

3.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS [7,9]

La composición de los NFVU, con elevados porcentajes de caucho, provoca que su compresibilidad sea elevada, alcanzando deformaciones de hasta el 40%-45% en ensayos edométricos. Los índices de compresión (C_c) oscilan entre 0,5-0,7. Por su parte, los módulos edométricos tienen rangos de entre 200 y 800 kPa para rango de presiones de entre 50 y 400 kPa[9]

Debido a su forma tórica y elasticidad, los NFVU son difícilmente compactables.

En ensayos de corte directo, se han obtenido valores medios de ángulo de rozamiento de 29,6º, variando entre 4º y 57º y cohesión oscilando entre 0-39 kPa[10], disminuyendo hasta los 20º en ensayos triaxiales[9]. El módulo de Young varía entre 130 y 1400 kPa.

3.2 PROCESAMIENTO O TRANSFORMACIÓN [2, 3, 14, 7, 8,]

El procesamiento o tratamiento de los NFVU suele iniciarse con la reducción de su tamaño. Existen distintos procesamientos que pueden ser desde totalmente mecánicos a otros que combinan tratamientos mecánicos con químicos o térmicos.

Entre los procesos mecánicos, muchos comienzan triturando los neumáticos enteros o cortándolos hasta tamaños comprendidos entre 25 y 400 mm. En algunos sistemas se eliminan los filamentos metálicos de los talones que los ajustan a las llantas antes de triturarlos;

A continuación, se describe el proceso de granulación que consiste en reducir el tamaño del neumático separando los tres principales componentes, caucho, acero y textil. En la primera fase se trocean los neumáticos hasta tamaños entre 50 y 300 mm. En una segunda fase, además de reducir el material a tamaños entre 5 y 25 mm, se separan magnéticamente los elementos metálicos. Posteriormente, el material puede ser sometido a otros procesos de granulación o molienda hasta reducirlo al tamaño deseado, clasificándolo finalmente por tamaños (0-0,8 mm; 0,8-2 mm; 2-4 mm; 4-10 mm) en función de la aplicación a la que se destina. Durante todas estas fases hay equipos de aspiración para la fibra textil y equipos de separación magnética para retirar los filamentos de acero.

Los procesos de reducción de tamaño pueden llevarse a cabo en equipos de molienda a temperatura ambiente o a través de molinos criogénicos. En éstos, tras una reducción mecánica de tamaño, el material granulado se lleva a una cámara de enfriamiento donde se utiliza nitrógeno líquido para enfriarlo entre -80º y -120º, por debajo de la temperatura de transición vítrea. A continuación, el material a baja temperatura procedente de la cámara se muele mediante molinos de martillos (fractura frágil) y se separan elementos metálicos y fibras textiles. El polvo de caucho de NFVU obtenido puede alcanzar tamaños de partícula por debajo de 0,15 mm.

3.2.1 OBTENCIÓN DEL POLVO DE CAUCHO DE NFVU

Los tamaños inferiores a 0,8 mm se conocen como polvo de neumático. Este polvo se obtiene mediante molienda mecánica a temperatura ambiente o criogénica. En ambos se ha de separar el caucho de los filamentos metálicos y la fibra textil. Con el sistema criogénico se obtienen texturas muy lisas y corte angular, con menor superficie específica.

Sin embargo, la obtención del polvo por tratamiento mecánico a temperatura ambiente permite obtener una textura más rugosa, con una superficie específica mayor que el sistema criogénico. En su aplicación en betunes, ambas propiedades mejoran notablemente la compatibilidad y la interacción entre el betún y el caucho. No obstante, la trituración mecánica produce una mayor heterogeneidad dimensional que perjudica a la estabilidad del sistema betún-caucho. Con el fin de mejorar la compatibilidad del polvo con el betún se han introducido cambios tecnológicos en la trituración.

En la Figura 4 se muestra un mapa con la distribución geográfica de las instalaciones operativas en España durante el año 2012 dedicadas al procesamiento y transformación de NFU mediante procesos de trituración y granulado. Por su parte, en la Figura 5 se detalla la localización de cada instalación.

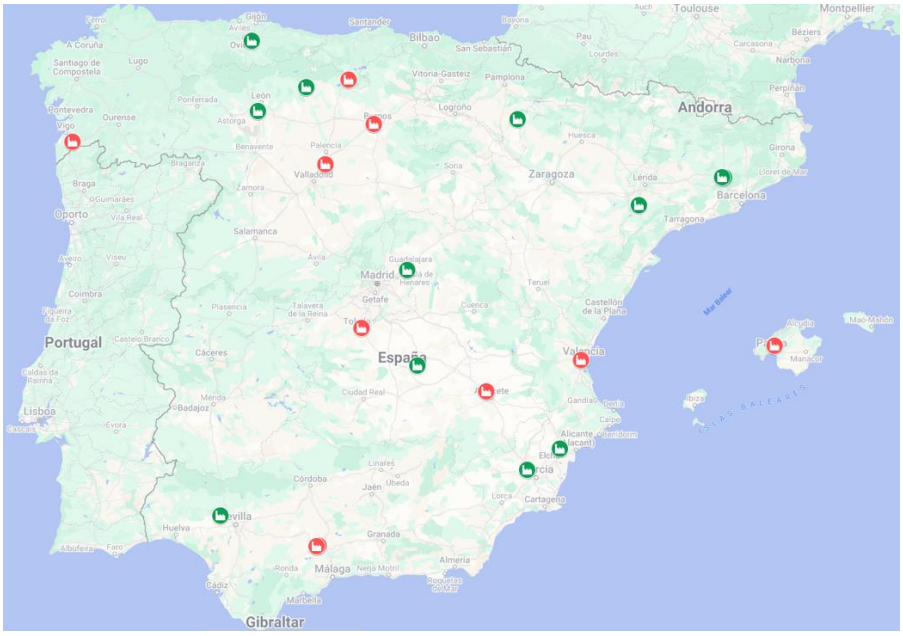




Figura 4. Ubicación de plantas de procesamiento y transformación de NFU (gentileza de TNU)

NOMBRE	PROVINCIA	LOCALIDAD	TIPO DE PLANTA
Serco Porriño S.L.U.	Pontevedra	Porriño	Solo triturador
Ecocastilla S.L.	Palencia	Dueñas	Solo triturador
Tratamiento de Residuos del Neumático S.L.	Toledo	Toledo	Solo triturador
Reciclajes Emilio S.L.	Valencia	Xirivella	Solo triturador
Reciclados de Neumáticos y Caucho del Sur S.L.	Málaga	Humilladero	Solo triturador
Gescaneus S.L.	Las Palmas	Agüimes	Solo triturador
Recuperaciones Emro S.L.	Albacete	Albacete	Solo triturador
Mac Insular S.L.	Baleares	Baleares	Solo triturador
Codefer S.L.	Cantabria	Mataporquera	Solo triturador
Recumatic S.L.	Burgos	Villalbilla de Burgos	Solo triturador
Neumáticos Adrián Moreno S.L.	Málaga	Mollina	Solo triturador
Martínez Cano Canarias S.A.	Santa Cruz de Tenerife	Güímar	Solo triturador
Gescometal 2002 S.L.	Asturias	Langreo	Granulador
Alfredo Mesalles S.A.	Barcelona	El Pont de Vilomara	Granulador
Industrias del Neumático S.A.	Alicante	Aspe	Granulador
Reciclado de Neumáticos de Castilla y León S.L.	Palencia	Guardo	Granulador
Recuperación Materiales Diversos S.A.	León	Ardoncino	Granulador
Recuperación Materiales Diversos S.A.	Sevilla	Aznalcóllar	Granulador
Indugarbi NFUS S.L.	Navarra	Murillo el Fruto	Granulador
Gestión Medioambiental de Neumáticos S.L.	Lleida	Maials	Granulador
Molins Solucions Industrials S.L.	Barcelona	Manresa	Granulador
Valoriza Servicios Medioambientales S.A.	Guadalajara	Chiloeches	Granulador
Reciclajes La Mancha S.L.	Ciudad Real	Campo de Criptana	Granulador
Reciclaje de Neumáticos y Caucho S.L.	Murcia	Ceutí	Granulador
U.T.E. Gemecan-Geneus	Las Palmas	Telde	Granulador

Figura 5. Detalle de la ubicación de plantas de procesamiento y transformación de NFU (gentileza de TNU)

3.3 PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO [16, 38, 92]

Propiedades físicas

El material procedente del troceado de neumáticos, también denominado como triturado, son piezas con forma irregular y con mayor o menor contenido de filamentos metálicos procedentes del acero del neumático. El tamaño de este material puede variar entre 25 y 400 mm. El tamaño medio depende de la criba que se ponga. La densidad de una pieza individual de triturado está comprendida entre 1,15 y 1,45 t/m^3, mientras que la densidad aparente del material triturado no compactado varía en función del tamaño y forma de los trozos, habiéndose obtenido valores entre 0,40 y 0,60 t/m^3. La densidad media para aplicaciones como rellenos con este material compactado bajo una tensión normal de 100 kPa está comprendida entre 0,72 y 0,92 t/m^3. La compactación del triturado con buldózer generan menores deformaciones que las obtenidas con rodillo liso.

Para material triturado con tamaños entre 13 y 76 mm, se han obtenido densidades sin compactar comprendidas entre 0,32 y 0,49 t/m^3, y entre 0,57 y 0,73 t/m^3 para el material compactado.

El triturado presenta una permeabilidad elevada, asimilable a la correspondiente a las arenas finas, con coeficientes de permeabilidad en el entorno de 5 x 10^{-2} cm/s. Este valor es indicativo, ya que en este caso el parámetro es muy difícil de ensayar al necesitarse células de ensayo bastante más grandes que las habitualmente disponibles en los laboratorios de Mecánica del Suelo, teniendo que emplear gradientes hidráulicos lo suficientemente bajos (i < 0,15) como para evitar que el agua pase de forma irregular y en régimen turbulento a lo largo de la columna de material troceado.

Para el caso del polvo de caucho con tamaño inferior a 0,8 mm empleado en las mezclas asfálticas, el peso específico es aproximadamente de 1,15 t/m^3 y el producto debe estar libre de material textil, metálico y de contaminantes.

Propiedades químicas

Los principales componentes del material procesado son: caucho (natural y sintético), negro de carbono y sílice, azufre, oxido de zinc y aditivos. Los fragmentos de neumático no son reactivos en condiciones ambientales normales (25ºC, 1 atm).

Para el caso particular de la aplicación en mezclas bituminosas, cuanto menor es el tamaño de las partículas del polvo de NFVU, menor es el tiempo de reacción o “digestión” con el betún.

De los resultados obtenidos en ensayos químicos de lixiviación se deduce que el empleo de triturado de NFVU como material de relleno viario es perfectamente viable desde el punto de vista medioambiental, ya que el agua que pudiera percolar a través del relleno presenta unas concentraciones de contaminantes inferiores a los valores límite de admisión en vertederos para residuos inertes según la Decisión del Consejo 2003/33/CE de admisión de residuos en vertederos (conclusiones procedentes de un estudio del CEDEX de 2008 (no público)).

Propiedades mecánicas

Su compactación es difícil de determinar en laboratorio debido a las grandes dimensiones del molde necesario para ello y al efecto rebote de la maza compactadora cuando golpea en las piezas de triturado de NFVU. Para su determinación en obra se suele cubicar la masa de NFU compactada en una determinada tongada de material.

Para determinar su resistencia al corte se han de emplear cajas de corte de grandes dimensiones capaces de albergar una cantidad significativa de piezas de triturado de NFVU. La interpretación de ensayos de corte directo realizados en caja de 1x1 m bajo tensiones normales comprendidas entre 20 y 100 kPa con material triturado y con mezcla triturado-suelo al 50% en volumen indican un ángulo de rozamiento entre 27 y 28,5º y una cohesión de 10 kPa, en el caso del material triturado, y de unas 35 kPa para la mezcla. El ajuste parabólico permite obtener el coeficiente de regresión más elevado, siendo el exponente de la ley parabólica ($\tau=a\cdot\sigma^b$) de aproximadamente 0,70 para los neumáticos troceados. Otros estudios indican valores de ángulo de rozamiento comprendido entre 6º y 60º con cohesiones entre 0 y 82 kPa.[92]

Las deformaciones verticales obtenidas en ensayo edométrico en caja grande de 1 m^3 bajo tensiones normales de entre 10 y 440 kPa con material triturado son algo superiores al 50% para la máxima carga noval, valores muy superiores a los obtenidos en ensayos de suelos. Los módulos secantes obtenidos están comprendidos entre 150 y 600 kPa en carga, y entre 250 y 1800 kPa en descarga, valores que se pueden calificar de bajísimos, tal y como era de esperar de un material tan deformable.

El tamaño de las piezas parece no afectar a los parámetros de cohesión, ángulos de rozamiento y módulos de deformabilidad del material de neumático troceado, siempre que esté comprendido entre 25 y 100 mm.

Otras propiedades

Los neumáticos tienen un poder calorífico elevado de 25-37 MJ/kg. De hecho, una tonelada de neumáticos equivale aproximadamente a 0,7 t de fuel-oil.

El análisis inmediato por combustión de NFU revela unos contenidos medios en materia volátil, carbono fijo y cenizas respectivamente de 64,0%, 29,5% y 6,5%.

3.4 APLICACIONES

3.4.1 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA [1, 2, 3 A 5, 19, 39, 40]

Uno de los destinos del NFVU es la valorización energética utilizándolo como combustible sólido recuperado. Su poder calorífico, superior al del carbón (25-37 MJ/kg), permite que se utilice como combustible en plantas industriales (cementeras, acerías, etc.) y en centrales de producción de vapor y energía eléctrica, aunque esta última aplicación se da mayoritariamente en los EE.UU. Según Valentini y Pagerotti (2022) el uso de los NFVU como aprovechamiento energético llegó al 40% en EE.UU, hasta el 75% en Japón y en la UE al 38%.

El empleo de NFVU en hornos de cementera y similares permite que los NFVU pueden usarse enteros o troceados, mezclados normalmente con otro combustible fósil y denominándose combustible derivado de neumáticos o "*Tire derived fuel (TDF)"* en su versión inglesa. El sector de la UE que más usa los NFVU como combustible es el de fabricación del cemento. Las distintas experiencias llevadas a cabo han demostrado que es absolutamente factible la valorización en hornos de cemento de hasta un 20% del combustible utilizado, con incorporación total de los metales procedentes de la armadura del neumático y sin variación en los componentes de los gases emitidos, exceptuando la reducción de los óxidos de nitrógeno y del SO_2, por el menor contenido en azufre que el combustible tradicional. En España existen un total de 22 plantas cementeras (ver Figura 6 que utilizan como combustible alternativo los NFVU, empleando en el año 2022 más de 173.500 toneladas[8].



Figura 6. Localización de las cementeras españolas que usan NFVU como combustible alternativo

Respecto a las emisiones de CO_2, y medido como factor de emisión, los NFVU de automóviles, usados como combustibles sólidos para la producción de calor o electricidad producen 62,8 $kgCO_e/GJ$, los NFU de camiones 55,9, frente a los 107 del coque de carbón(18).

Por otro lado, cabe mencionar el proceso de pirólisis de los NFVU, que supone la descomposición química de los neumáticos a temperaturas entre 300 y 800ºC en ausencia de oxígeno, produciéndose en torno a un 43% de aceite pirolítico (*"tyre pyrolysis oil" (TP0))*, un 41% de negro

[8] https://www.recuperaresiduosencementeras.org/observatorio-de-economia-circular/combustibles-derivados-de-residuos/

de carbón recuperado (*"raw recovered carbon black" (RRCB))* y un 15-16% de gas de proceso (*"tyre pyrolysis gas" (TPG))*. El gas se aprovecha en el propio proceso de pirólisis, el aceite se utiliza como combustible o como precursor de componentes químicos y materiales [19]. El negro de carbón se emplea en la fabricación de productos y su recuperación como sustituto del negro de carbono virgen. En función del destino de los diferentes productos del proceso de pirólisis su contribución será valorización material o energética. A fecha de redacción de este documento, se tiene constancia de la existencia de dos plantas de pirólisis de NFVU: una localizada en Zaragoza perteneciente a la empresa Greenval Technologies S.L y la otra en Alcázar de San Juan perteneciente a la empresa Recycled Garbage System 2 S.L.

3.4.2 OBRAS DE TIERRA Y TERRAPLENES[1, 2, 5,, 41, A 57]

Principalmente se han utilizado neumáticos troceados y granulados como material de relleno ligero en el interior de terraplenes construidos en EEUU [41 a 44], aunque también en la UE [45] y otros países[1, 460]. Esta aplicación presenta como principales ventajas la utilización de grandes cantidades de residuo, un peso reducido, la mejora de la permeabilidad y la resistencia a la penetración de la helada, además de una durabilidad elevada. Aunque el triturado de NFVU es resistente a las radiaciones ultravioletas y es no biodegradable, su utilización puede tener alguna influencia en el medio ambiente cuando éste se coloca bajo la capa freática[16, 47, 48].

Las piezas de NFVUt se pueden utilizar solas o mezcladas con material térreo. Aunque esta mezcla no tiene el carácter aligerante del relleno de neumáticos troceados, es un material más denso, menos deformable y más fácilmente compactable [16, 49, 50, 51].

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX participó en un proyecto I+D+i cooperativo entre las empresas CEMOSA, LABIKER, SACYR y SIGNUS, financiado por el CDTI para la construcción de un terraplén experimental en el Ramal 3 del Enlace 1 de la Autopista AP-46, Alto de Las Pedrizas (Málaga), compuesto por dos tramos: uno relleno de NFVU troceados y otro relleno de mezcla de triturado de NFVU-suelo. Para su ejecución se determinaron de forma previa los parámetros y condiciones de compactación, tanto de tiras de NFVU como de mezcla de triturado de NFVU con suelo, mediante la realización previa de ensayos de laboratorio [16] y la ejecución de bandas de ensayo fabricadas con este tipo de materiales [52]. Durante su construcción se instrumentaron intensamente distintas secciones del terraplén para el control y seguimiento de parámetros geotécnicos y medioambientales de interés.

A la vista de los resultados obtenidos en dicho estudio, el Laboratorio de Geotecnia ha publicado los resultados [14]. Las pautas de diseño dadas en la Guía, publicado son las siguientes:

- Las piezas de triturado de NFVU sólo se pueden colocar en el núcleo de los rellenos.
- Las capas de triturado de NFVU han de colocarse por encima del máximo nivel freático esperable y de la cota de inundación prevista en la zona de implantación.
- La cara inferior de las capas de triturado de NFVU debe estar situada, al menos, a 1 m por encima de la cota superior del terreno natural.
- La cara superior de la capa de triturado de NFVU de mayor cota debe estar, como mínimo, a 1 m de la cara superior de la coronación del terraplén.

- El espesor de las capas de triturado de NFVU no debe ser mayor de 3 m.
- Las capas de triturado de NFVU han de envolverse en geotextiles para evitar la percolación de partículas de suelo entre el triturado.
- La distribución de tamaños y el contenido de alambres expuestos del triturado de NFVU serán los de un material Tipo B (Clase II) de la Norma ASTM D6270-08$^{\varepsilon 1}$.
- Para una mezcla de relleno de triturado de NFVU-suelo con las mejores características mecánicas posibles, lo más idóneo es fabricarla al 50% en volumen de ambos materiales.
- Las capas intermedias de material térreo que hacen refuerzo estructural deben tener un espesor mínimo de 1 m y estar exentas de materia orgánica.
- Los espaldones del relleno deben asegurar la impermeabilidad ante el agua o aire, y tener anchura suficiente para su adecuada compactación.
- La capa de coronación ha de minimizar la infiltración del agua de lluvia hacia las capas de triturado de NFVU, drenándola con una ligera pendiente lejos de la estructura.

Es conveniente realizar un control del comportamiento a largo plazo de los rellenos viarios de triturado de NFVU. Para ello se ha de instalar la instrumentación adecuada en diversas secciones de la estructura con la que registrar la variación temporal de la temperatura de las capas de triturado de NFVU y las inclinaciones verticales y asientos sufridos. También resulta interesante determinar la composición de los lixiviados que atraviesan el relleno de triturado de NFVU, así como medir las presiones intersticiales y cargas verticales existentes.

Existen otras aplicaciones como relleno de trasdós de muros de contención [55, 56], ya que debido a su elevada deformabilidad son capaces de absorber el esfuerzo de compactación del relleno sin generar grandes empujes sobre el muro (2/3 de los habituales). Además, su permeabilidad elevada hace que actúen como drenes, lo que permite reducir de forma importante el coste de las estructuras de contención.

También se pueden utilizar como relleno de gaviones. En el caso de utilizarse NFVU troceados, éstos son comprimidos al introducirlos en los gaviones[1], mientras que si se utilizan NFVU enteros son rellenados con granito machacado a la par que se apilan[57].

3.4.3 CARRETERAS [13]

La utilización del polvo de caucho en obras de pavimentación se puede realizar por uno de los siguientes procedimientos:

- Por vía húmeda, procedimiento que consiste en la mezcla a alta temperatura de polvo de caucho (normal o aditivado) con un betún de penetración durante el tiempo suficiente para modificar sus propiedades.
- Por vía seca, procedimiento que consiste en la incorporación del polvo de caucho (normal, aditivado o pretratado) directamente a la amasadora de la central de fabricación de la mezcla bituminosa, como uno más de sus componentes.

También se utilizan en elementos de seguridad vial y pantallas anti-ruido.

La incorporación del polvo a una mezcla bituminosa por estas vías modifica sus propiedades reológicas y mecánicas mejorando algunas de sus prestaciones como material para carreteras: Por un lado, se permite un aumento del contenido de ligante, lo que está asociado a mayor resistencia a la fisuración, a la fatiga, al envejecimiento y, por tanto, una mayor durabilidad. Por otro lado, la interacción entre el caucho, el betún y los áridos permite una mayor resistencia a las deformaciones plásticas y al deslizamiento. En muchos casos también se ha apreciado cierta disminución del nivel sonoro de rodadura. El grado de interacción del polvo con el betún depende del procedimiento seguido para su obtención, por lo que el control de variables de fabricación como la temperatura, el tiempo y la energía de cizalla inciden en la posterior obtención del betún modificado con caucho.

En el año 2007 se aprobó la Orden Circular 21/2007, relativa al uso de ligantes y mezclas bituminosas que incorporan polvo de caucho procedente de NFVU y asimismo se publicó el Manual de empleo de caucho de NFVU en mezclas bituminosas, elaborado por el CEDEX. Un año más tarde se aprobó la Orden Circular 24/2008 por la que se modifican los artículos 542 y 543 del PG-3 sobre mezclas bituminosas de aplicación general, y en la que se incluyen los betunes con caucho como tipos adicionales de ligante.

La Orden Circular 21/2007 establece los requisitos que han de cumplir los ligantes y las mezclas bituminosas que incluyan polvo de caucho procedente de los NFVU. La incorporación de caucho puede realizarse por vía húmeda para los betunes obteniéndose tres tipos: betún mejorado con caucho (BC) (incluye un 8%-12% de NFVU respecto de la masa final del ligante), betún modificado con caucho (BMC) (incluye un 12%-15% de NFVU) y betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC) (incluye >15% de NFVU). Tales porcentajes de polvo de caucho figuran únicamente en el Manual del CEDEX. Lo hacen a modo de información orientativa, sin ser de obligado cumplimiento. De hecho, posteriormente se han ido desarrollando otros ligantes cuyo contenido en caucho NFVU no se ajusta a dichos valores.

Cuando el polvo de caucho se introduce por vía seca se obtiene una mezcla bituminosa que se denomina, de acuerdo con la OC 21/2007, mezcla bituminosa en caliente con adición de caucho. Es una técnica menos extendida que la vía húmeda, ya que se requiere un mayor cuidado en su ejecución para asegurar que todo el caucho incorporado a la mezcla interaccione adecuadamente con el betún (digestión) y pueda aportar las mejoras potenciales antes señaladas.

Esta Orden Circular se completa con la OC 21bis/2009 (23 de marzo de 2009), relativa al almacenamiento en planta de ligantes con caucho.

Junto a los documentos normativos mencionados y el Manual de empleo de caucho de NFVU en mezclas bituminosas del CEDEX (mayo de 2007)[(12)], la entidad SIGNUS ECOVALOR también ha publicado los trabajos: Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático (2014)[(20)], Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático (2017)[(90)], 20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas (2017)[(35)] , Mezclas semicalientes con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil (2019)[(91)] y Manual de recomendaciones para el diseño y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca (2022)[(21)].

Más recientemente, la Nota Técnica NT 02/2020 regula el uso de los nuevos aditivos de caucho pre-digerido o pre-tratado desarrollados en los últimos años. Mediante este método de incorporación, denominado inicialmente vía semiseca o semihúmeda, el polvo de caucho NFVU se encuentra ya digerido parcialmente con un pequeño porcentaje de betún mezclado con otras partículas minerales, o bien ha sido tratado con aditivos que lo hacen más compatible con el betún de la mezcla. En ambos casos se obtienen productos que pueden incorporarse más fácilmente a la mezcla bituminosa por vía seca, pero sin los problemas de esta (se elimina el tiempo de digestión necesario antes del extendido), ni tampoco los de la vía húmeda (adopción de medios especiales en las plantas asfálticas para evitar la sedimentación y acumulación de restos de betún con caucho).

En la actualidad existen dos productos registrados como aditivos a base de polvo de caucho NFVU fabricados con estas tecnologías. Su introducción ha permitido extender la utilización de las mezclas bituminosas obtenidas por vía seca a tráficos pesados, dado que se ha solucionado la incertidumbre sobre el porcentaje de caucho que por vía seca se incorpora realmente al ligante, al haberse completado de forma adecuada su digestión.

3.4.4 EDIFICACIÓN Y OBRA PÚBLICA [3, 4, 59, 61, 62]

La incorporación de materiales procedentes de NFVU a los hormigones ha sido estudiado por numerosos autores, la mayor parte desde un punto de vista teórico a nivel de laboratorio. La mayoría de los trabajos se centran en la incorporación del caucho como sustitución del árido grueso y/o fino del hormigón, y denominado en su versión inglesa como "*Rubberised concrete*" *[22, 23, 24, 27 ,2930, 31, 32, 33]*. También hay estudios relativos a la fabricación de hormigón reforzado con las fibras de alambres de los NFVU [23, 24, 25, 26, 28, 29].

En general, los estudios demuestran que la incorporación de caucho produce una mayor resiliencia, durabilidad y elasticidad del hormigón, por lo que su uso podría ser beneficioso en construcciones sometidas a impactos o vibraciones. No obstante, también se ha detectado que la incorporación de NFVU en el hormigón puede producir una pérdida de hasta el 85% en la resistencia a compresión del hormigón cuando se sustituye el árido grueso, y hasta del 65% cuando es el árido fino el que se sustituye. La resistencia a tracción puede disminuir hasta un 50% en ambos casos [11]. Al sustituir el árido grueso, el módulo de elasticidad se reduce hasta aproximadamente el 70% del hormigón original, y hasta el 50% cuando se sustituye el árido fino. Esta reducción del módulo de elasticidad indica una mayor flexibilidad.

Debido a la gran pérdida de resistencia que se produce, desde un punto de vista práctico no convendría sustituir más de un 20% del total de los áridos por neumáticos troceados[12]. Con este porcentaje, para un hormigón de referencia de 34 N/mm^2 de resistencia a compresión se pueden obtener una resistencia de hasta 25 N/mm^2. No obstante, hay estudios recientes como el de Islam et al. (2022) o Guiñez et al. 2024 que muestran la posibilidad de conseguir hormigones con sustitución total de los áridos gruesos y analizar los factores que influyen en su comportamiento, o el pretratamiento para evitar esta pérdida de resistencia[27]

Entre las características del hormigón al que se ha añadido caucho está su baja densidad, que hace que sea apropiado para aplicación en edificaciones en las que se requiera un peso reducido, como relleno de interiores. Presenta también una rotura plástica dúctil y puede absorber gran cantidad de energía plástica y resistir grandes deformaciones bajo presión, por lo que es apropiada para bases aislantes de estructuras o construcción de barreras acústicas o protección contra impactos. Otro campo de aplicación es su uso en estructuras sometidas a movimientos sísmicos.

3.4.5 OTRAS APLICACIONES [3, 4, 34, 63 A 70,]

- **Pavimentos en continuo y losetas de seguridad:** El material de NFVU granulado con tamaño entre 2 y 8 mm, previo tratamiento, cumple perfectamente para crear superficies de pistas de atletismo y ecuestres, campos de juego, parques infantiles y piscinas, entre otros. Presenta como ventajas que se puede colocar sobre toda clase de terrenos, supone un ahorro de costes de mantenimiento, tiene elevada resistencia climática y presenta un acabado limpio y visual ya se puede mezclar con pinturas, además de prevenir de lesiones. Requiere estar totalmente libre de acero.
- **Relleno de balsas de infiltración de aguas pluviales:** se emplea tanto neumático entero como triturado (producto patentado en Francia como Draingon®). Dicha aplicación ya se ha desarrollado en territorio francés debido a las grandes ventajas que presenta tales como su gran capacidad de drenaje, gran capacidad de almacenamiento de agua, su no apelmazamiento y su resistencia a agentes químicos y microorganismos.
- **Sistemas de drenaje en vertederos**: en los vertederos es necesario la existencia de capas drenantes para el guiado del biogás y los lixiviados generados, que no sean reactivas y capaces de absorber los empujes generados por desplome de los residuos. Esta es la aplicación más empleada para el reciclaje de NFVU en la obra civil ya que los neumáticos triturados, además de cumplir las propiedades citadas, son también drenantes y no compactables ni reactivos.
- **Protección y seguridad:** Los NFVU enteros permiten crear barreras de seguridad en circuitos de Fórmula 1, moto y pistas de pruebas. También pueden ser empleados para la amortiguación de colisiones de vehículos en rotondas y bandas quitamiedos, o de embarcaciones en puertos y embalses.
- **Superficies deportivas de Césped artificial:** Una de las principales aplicaciones del caucho reciclado procedente del neumático al final de su vida útil (NFVU) es su utilización en campos de fútbol y rugby de césped artificial. En función del tamaño de granulado, existen dos vías de utilización:
    - Material de relleno: las partículas de caucho, cuyo tamaño está entre 0,5 y 2,5 mm, no solo se utilizan para mantener erguidas las fibras de plástico que simulan el césped, cuya longitud es de entre 40 y 65 mm, sino que también le otorgan al pavimento el confort y la seguridad que los jugadores necesitan al correr, caerse o deslizarse sobre este tipo de superficies. Además de simular perfectamente las características dinámicas del desplazamiento del balón sobre césped artificial. El consumo de granulado de caucho es de 10-12 kg/m^2.

- Base elástica: el granulado de caucho, en este caso con un tamaño de partícula entre 4 y 8 mm, se encuentra aglomerado con una resina de poliuretano y actúa como capa de absorción de impacto, por debajo de la capa de fibra de plástico. El consumo de granulado para este caso es de 14 kg/m^2 (espesor capa 2,5 cm).

- **Ornamentación:** Puede tener un uso ornamental en jardines artificiales, áreas verdes y rotondas.
- **Atenuadores de oleaje:** construcción de rompeolas flotantes con NFVU entero de igual llanta y diferentes dimensiones adaptados uniformemente de manera que reduzcan la fuerza de impacto en puntos de reflejo de las ondas.
- **Protección exterior de taludes:** Los NFVU enteros rellenos de granito machacado puede utilizarse en sustitución de piezas de hormigón o grandes piedras para evitar desprendimientos o la erosión del talud provocada por el agua.
- **Usos varios**[34]**:** NFVU como pantallas para amortiguación del sonido, polvo de caucho (<0,8 mm) para fabricar forros de freno de camión, caucho regenerado para fabricación de gomas, acero de las carcasas para industria siderúrgica, o para fabricar calzado o bien piezas de caucho en continuo con la ayuda de resinas termoestables, tapado de alcorques, entre otros.

3.5 OBRAS REALIZADAS

Existe una amplia experiencia internacional en el uso de NFVU reciclados en la construcción de carreteras, fundamentalmente en los EE.UU. [1, 11, 47, 71]. En España, se empezó en el año 1974, en el Centro de Investigación E.S.M., trabajando en formulas de incorporación de caucho al betún que se aplicaron con éxito en calles de la ciudad de Barcelona [72].

Posteriormente, se ejecutó un tramo de ensayo en una carretera secundaria con tráfico ligero en el término municipal de Vacarisses (Barcelona), gracias a la colaboración entre distintas CC.AA., organismos relacionados con el medio ambiente y empresas del sector, en colaboración con centros de investigación y Universidades.

En 1997 se realizó un nuevo tramo de ensayo de 850 m en la carretera B-140 entre Sabadell y Mollet del Vallés (Barcelona) con un tráfico T2, colocando una capa bituminosa de 5 cm de espesor de mezcla S-12, dosificada con un 2% de polvo de neumáticos y 6% de betún, en la mitad del tramo, y una mezcla S12 convencional en la otra mitad [73, 74]. En varías obras de Andalucía se han utilizado micro-aglomerados de granulometría discontinua de betún modificado con polvo de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso [67, 75 a 81].

En la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 se presentan numerosos ejemplos de tramos de carreteras construidos hasta el año 2007, en los que se han empleado mezclas bituminosas con polvo de NFU por “vía húmeda” o “vía seca”.

Tabla 2. Tramos de "vía húmeda" con betún fabricado en central de betunes

TRAMO	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor (cm) y tipo de mezcla	Caucho en Betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla-Cazalla de la Sierra.	1996	0,300	T2	3	-	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,330	T2	5	-	4,9
M-221 y M-222: Valdaracete- Brea del Tajo	2002	12	T3	5(S-20)+5(D-20)	10	5,6
Tr. de Badarán (La Rioja)	2004	0,7	-	-	-	-
Tr. de Argamasilla de Calatrava (C. Real)	2004	0,5	-	-	-	-
VA-20: Ronda Este de Valladolid	2004	0,3	T0	9 (MAM)+6(S-20)	9	-
A-6	2004	0,5	T1	8(G-20)+6(S-20)	9	-
A-6: Tordesillas	2005	0,8	T0	6 (S-12)	9	5

Tabla 3. Tramos de "vía húmeda" fabricando el ligante en el lugar de empleo

TRAMO	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor (cm) y tipo de mezcla	Caucho en Betún (%)	Betún (%)
A-372 y A-372: Ubrique-El Bosque	2002	16	T3	5(S-20)+2,5(F-10)	13	5,5
M-221 y M-222: Valdaracete	2002	12+	T3	5(S-20)+5(D-20)	13	5,6
AP-7	2002	1,8	T1	4 y 6(abierta-12,5)	20	9
	2004	4,2		6(abierta-12,5)	20	9
	2005	11,4		6(abierta-12,5)	20	9
VA-20:Ronda Este de Valladolid	2004	0,300	T0	6(S-20)	13	5,5
ZA-611: Toro-Venablo	2004	4	T2	4(S-20)	13	5,5
VA-404: Medina del Campo- Matapozuelos	2004	0,820	T3	6(S-12)	13	5,5
VA-113: Valladolid-Santovenia de Pisuerga	2004	0,150	T2	5	13	5,7
S-444: Revilla de Camargo-Puente Arce	2004	7,7	T2	3+6(Abierta-12,5)	20	9
Urbano: Pº Canalejas (Salamanca)	2004	7	-	4(Abierta-12,5)	20	9
Urbano. Calle Soto. (Valladolid)	2004	1,2	-	4(Abierta-12,5)	21	9
A-4: Tembleque	2004	1,2	T0	5(Abierta-12,5)	20	9
Ronda Este de Valladolid	2004	0,3	-	6(S-20)	13	5,15
ZA-611: Toro-Venialbo	2004	4		4+4(S-20)	13	5,2
		4		4(S-20)	13	5,2
LE-611: Carrizo de Ribera-Hospital Órbigo	2004	0,3	T2	6(S-12)	20	6,6
Urbano: Paseo Juan Carlos I de Valladolid	2004	0,4	-	3(M-10)	13	5,6
N-610: Becilla de Valderaduey-Benavente	2005	1,5	T1	5(S-12)	13	5,5
A-6: Tordesillas	2005	0,8	T0	6(PA-12)	9	5,0
LE-232 Sahagún-Almanza	2005	1	T3	4	13	5,5

Tabla 4. Tramos de "vía seca" construidos hasta el año 2007

TRAMO	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor (cm) y tipo de mezcla	Caucho en Betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla- Cazalla de la Sierra	1996	0,3	T2	3(F-10)	1	5,7
Alicante-Altea, Elche-Murcia, Orihuela- Torrevieja (varios tramos)	1998-2005	65	-	3(M-10)	0,5	5,2
Generalitat Valencia	1996-2004	18,5 4,5	-	3(M-10) 5 (S-12)	0,5	5,2
N-344: Travesía de Caudete N-332: Favara	1999 2004	1,1 2	- -	3(M-10) 3(M-10)	- 0,5	- 5,2
Carretera de Castraz	2004	1,5	T2	5 (S-12)	1	5,3
Variante de Tordesillas A-6	2006-2007	0,3	T0	6(S-20)+6(S-12)	-	-

Tras la entrada en vigor de la OC 21/2007 el uso de betunes y mezclas asfálticas modificadas con polvo de NFVU se extiende, siendo de uso generalizado. El documento de SIGNUS "20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas"[35] sirve como actualización de los datos hasta el primer trimestre de 2017. El producto patentado RARx™ incluye en su composición un 60% de polvo de NFVU. En su página web se incluye información sobre las obras en las que se ha empleado (https://cirtec.es/obras-ejecutadas/).

El empleo de trozos de neumáticos como áridos para hormigones es todavía con carácter experimental y, aunque se han hecho estudios recientes, no se tiene constancia de obras en las que se haya empleado este material.

Las principales aplicaciones del neumático troceado en vertederos [3, 4] para construir capas estructurales o de drenaje son las siguientes:

- Capa de recogida de aguas superficiales en L´Aldea, Tarragona (2007).
- Capa de recogida de biogás en Montalbán, Córdoba (2007 y 2011) y Vasequillo, Málaga (2009).
- Capa de protección de lámina de impermeabilización en los vertederos de Igorre, Vizcaya (2008) y Los Ruices, Málaga (2009), así como en el sexto vaso de vertido en el de Valsequillo, Málaga (2011).

En 2008 se construyó una balsa de infiltración con NFVU enteros en Villanueva de Gállego (Zaragoza) para recoger las aguas pluviales del techo de un almacén logístico de 40.000 m^2. En ese año también se construyó una balsa abierta para almacenaje de agua en el sistema de protección contra incendios de Peñarroya (Córdoba) usando NFVU enteros y troceados. En 2009 se impermeabilizó el vaso del embalse de Cancarix (Albacete) con NFVU enteros rellenos de hormigón sobre el solape entre geomembranas.

También se han construido amainadores de oleaje con NFVU enteros en el Pantano de Valdecañas, Cáceres (2009) y en el Puerto Marina El Rompido, Huelva (2011) [3, 4].

En el año 2006 se construyó por primera vez en España un tramo de terraplén[82] relleno con neumáticos troceados en el Paso de Salomón de la carretera M-111 (P.k. 4+730) de la Comunidad de Madrid, con una longitud de 105 m y una altura comprendida entre 7,2 y 8,8 m. Se realizó con 2,1 t de NFVU troceados con un tamaño máximo de 400 mm, colocados y compactados en unas capas de 2 m de espesor.

Dos años más tarde se construyó otro terraplén con relleno de triturado de NFVU entre el P.k. 0+39 y P.k. 0+160 del eje MD-VS1-A de la vía de servicio que da acceso al enlace San Isidro del Aeropuerto Sur de Tenerife, con 65 m de longitud, 20 m de altura máxima y 11,5 m de ancho de coronación. Se definió una sección de menor altura con una capa de triturado de NFVU de 1 m de altura y otra de más altura con dos capas de triturado de NFVU del mismo espesor.

Durante los cinco primeros meses del año 2011, el consorcio de empresas formado por SACYR, CEMOSA, LABIKER y SIGNUS, con la colaboración técnica del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, ha ejecutado un tercer terraplén experimental con neumáticos troceados y mezcla de triturado de NFVU -suelo como material de relleno. Dicho terraplén, construido entre el P.k. 0+165 y el P.k. 0+265 del Ramal 3 del Enlace 1 de la Autopista AP-46: Alto de Las Pedrizas (Málaga), está compuesto por dos tramos claramente diferenciados: uno con dos capas de relleno de triturado de NFVU y otro con una de mezcla al 50% en volumen de triturado de NFVU y del suelo empleado para construir el terraplén. Estas capas tienen un espesor de 2 m y están protegidas por espaldones y separadas por una capa intermedia de 1 m de espesor del suelo seleccionado usado en la cimentación, espaldones, coronación y precarga. El espesor de la coronación en todo el terraplén es como mínimo de 1 m, el punto de mayor altura del terraplén es de 12,8 m y la anchura máxima en cimiento de 41,1 m, con una anchura final en coronación de 11,3 m a cota de cimiento de la precarga. En mayo del 2010, antes de su construcción se ejecutaron bandas de prueba de compactación del neumático troceado usado en el terraplén[16, 17, 50], cuyas características geotécnicas y medioambientales fueron determinadas también de forma previa en el Laboratorio de Geotecnia [16].

En los tres terraplenes experimentales citados las capas de triturado de NFVU se envolvieron sucesivamente con geotextil y material de terraplén de 1 m de espesor, y se instrumentaron diversas secciones transversales a diferentes alturas para seguir su comportamiento y evolución a largo plazo. En base a los resultados obtenidos, el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha llegado a la conclusión que la construcción de un relleno viario con triturado de NFVU es perfectamente viable desde un punto de vista técnico y ambiental, siempre que se cumplan estrictamente las condiciones de proyecto, ejecución y control incluidas en Vicente et. al (2022).

4. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

La Ley 7/2022, de 8 de abril, sobre Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular, establece en su artículo 6 que los residuos deben identificarse y clasificarse conforme a la Lista Europea de Residuos. Esta lista fue actualizada por la Decisión de la Comisión de 18 de diciembre

de 2014, que modifica la Decisión 2000/532/CE, en aplicación de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

Los neumáticos fuera de uso vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Apartado 16 correspondiente a "Residuos no especificados en otros capítulos de la lista" con el código 16 01 03 "Neumáticos al final de su vida útil" e identificados como residuos no peligrosos.

La Directiva 99/31/CE del Consejo de la Unión Europea sobre vertido de residuos, así como el Real Decreto 715/2025 establecen la prohibición del vertido de NFVU enteros, de cualquier tamaño (los RD anteriores incluían excepciones a los mayores de 1.400 mm).

La combustión no controlada de los neumáticos puede dar lugar a la emisión de contaminantes a la atmósfera como, por ejemplo, óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y dibenzofuranos. No obstante, las instalaciones donde se valorizan energéticamente los neumáticos son instalaciones controladas y seguras que están provistas de filtros y equipos para evitar que estos contaminantes lleguen a la atmósfera. [36].

En el documento "Tyre Recycling after 2000: Status and Options"[11] se hace una amplia referencia a los estudios que se han realizado a nivel mundial sobre el riesgo potencial que para el medio ambiente y la salud humana puede suponer el reciclado de los neumáticos fuera de uso. En ningún caso los NFVU figuran como residuos peligrosos.

Desde el punto de vista de la lixiviación, distintas investigaciones realizadas en los EE.UU (84 a 86) y Canadá (87) sobre la seguridad a largo plazo de la utilización de materiales procedentes de neumáticos reciclados, han puesto de manifiesto que la mayoría de los componentes detectados en las muestras analizadas lo están en porcentajes inferiores a los exigidos en las normas, incluidas las de aguas potables. Además, la cantidad disuelta en el agua freática de la mayoría de las substancias que podrían potencialmente lixiviarse de los neumáticos, tales como aluminio, bario, cromo, hierro, manganeso y cinc, es poco significativa. A continuación, se indican algunos usos de NFVU en elementos constructivos del vertedero: NFVU entero empleado para la protección de la lámina de impermeabilización del vaso del vertedero; NFVU triturado para material de drenaje de recogida en las chimeneas de biogás del vertedero; NFVU triturado empleado como material de drenaje para la recogida de las aguas superficiales; NFVU triturado empleado como material de drenaje para la recogida de los lixiviados.

En los estudios de lixiviación realizados por el CEDEX[37] se comprobó que la cantidad de Fe, Mn y Zn disuelta aumenta considerablemente cuando las piezas de triturado de NFVU permanecen durante unos días sumergidas y en contacto permanente con agua, a causa de la oxidación de los alambres expuestos. Cuando las piezas de neumático troceado se someten a condiciones muy ácidas se facilita enormemente la liberación metales pesados como Ba, Cd, Cr, Pb y Zn [88], mientras que cuando se someten a pH muy básicos lo que aumenta en disolución es el carbono orgánico total ó COT [84].

Otras afecciones al medio ambiente, de los NFVU están asociadas al peligro potencial de incendios y por constituir el hábitat de organismos infecciosos. La probabilidad de autocombustión de los NFVU está asociada a la presencia de alambres de acero, por lo que las recomendaciones de uso limitan el contenido en elementos metálicos. Hay que tener en cuenta

que los incendios, una vez iniciados, son difíciles de extinguir y pueden durar semanas, e incluso meses. Los humos densos creados se pueden trasladar a grandes distancias.

La Orden TED/1522/2021 establece cuándo el granulado de caucho y el polvo de caucho dejan de tener la condición de residuo según la ley 22/2011. Los usos indicados son:

- Campos de césped artificial y bases para otros campos deportivos;
- Pavimentos para parques infantiles, pistas deportivas y pavimentos de seguridad;
- Piezas moldeadas y artículos de caucho; o
- Mezclas bituminosas.

No obstante, el artículo 4 de esta misma orden establece las limitaciones de uso, donde no se permite en artículos o materiales que estén en contacto permanente con la piel. La Figura 7 muestra el extracto de lo recogido en este artículo.

Artículo 4. *Limitaciones en la utilización de caucho granulado o de polvo de caucho que ha dejado de ser residuo.*

1. No estará permitido el uso de caucho granulado o polvo de caucho, en artículos cuya finalidad requiera el contacto permanente con la piel, salvo que para el uso que se destinen se cumplan los umbrales establecidos en el Anexo XVII del Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006 al que se hace mención en el artículo 7.2, tales como:

a) Equipos deportivos, como puños de bicicletas o empuñaduras de palos de golf y raquetas;
b) Utensilios para el hogar, como utensilios de cocina o andadores.
c) Herramientas de uso doméstico, prendas de vestir, guantes y ropa deportiva.
d) Correas de relojes, pulseras, máscaras, cintas para el pelo.
e) Juguetes y artículos para la puericultura.
f) Materiales para la industria farmacéutica.
g) Materiales en contacto con alimentos.

2. No estará permitido el uso de caucho granulado en aplicaciones en que se utiliza como material no ligado en campos de césped artificial o en bases para otros campos que no cuenten con las medidas de contención adecuadas para reducir y controlar la liberación de partículas al medio.

Figura 7.- Limitaciones de uso del granulado y polvo de caucho según la Orden TED/1522/2021

Por otro lado, hay que destacar la reciente restricción de microplásticos en la UE publicada mediante el Reglamento 2023/2055 de la Comisión, donde se establece que a partir de octubre de 2031 quedará prohibida la comercialización del granulado y polvo de caucho como material de relleno empleado en las superficies deportivas de césped artificial, que en la actualidad es el principal destino de reciclaje (llega a alcanzar el 50%)[9]. No obstante, el 28 de febrero del 2017, la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA), por encargo de la Comisión Europea (junio 2016), publicó un informe sobre la evaluación de los posibles riesgos para la salud del granulado de caucho reciclado utilizado como relleno en campos deportivos de césped artificial. El informe concluyó que "*el riesgo para la salud por la exposición de las sustancias encontradas en el granulado de caucho reciclado es muy bajo*", por lo que la ECHA no ha encontrado ninguna

[9] https://www.retema.es/actualidad/riesgo-principal-destino-del-caucho-reciclado-del-neumatico-al-final-su-vida-util

razón para desaconsejar la práctica de juego en superficies deportivas de césped sintético que contengan granulado de caucho reciclado.[10]

Referente a la degradación del neumático durante su vida útil, el estudio de Valentini y Pegoretti (2022) se indica que el 15% en masa de los neumáticos de vehículos de pasajeros y el 18% para los neumáticos de los camiones se pierde por abrasión durante su vida útil, generando un residuo que acaba en las cunetas de las carreteras y sin opción a valorización.

4.1 INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Los indicadores de sostenibilidad ambiental son herramientas utilizadas para medir y evaluar el desempeño ambiental de una empresa, organización o proyecto.

Estos indicadores ambientales proporcionan información cuantitativa y cualitativa sobre diversos aspectos relacionados con el impacto ambiental de las actividades empresariales, permitiendo así monitorear, analizar y mejorar las prácticas ambientales.

- En el caso del polvo y el granulado de caucho procedente del NFVU, las evidencias para valorar los indicadores ambientales se basan en: Declaración ambiental de producto DAP (EN 15804:2012 + A2:2020). La ecoetiqueta DAP es una herramienta para mostrar el mejor comportamiento ambiental de un producto. La ISO 14025 define los requisitos que deben cumplir estas Declaraciones ambientales, incluyendo la verificación por tercera parte.
- Sistema de Gestión ambiental de las fábricas: Gestión medioambiental (UNE EB ISO 14001 o reglamento 1221/2009 (EMAS); Sistema de gestión energética (UNE EN ISO 50001) o Sistema de gestión de la calidad (UNE EN ISO 9001).

Un ejemplo de declaración ambiental de producto para el polvo de caucho y el granulado de caucho es el obtenido para Valoriza Eco-Rubber [11].

Además, hay otros productos de caucho procedente de NFVU específicos para su empleo en mezclas bituminosas que cuentan con Declaración Ambiental, como es el caso del producto RARx, aditivo de caucho para mezclas asfálticas[12].

[10] https://echa.europa.eu/documents/10162/13563/annex-xv_report_rubber_granules_en.pdf/dbcb4ee6-1c65-af35-7a18-f6ac1ac29fe4

[11] https://www.aenor.com/Producto_DAP_pdf/GlobalEPD%20EN15804-075%20Valoriza_polvo%20y%20granulados_LVR.pdf

[12] https://cirtec.es/wp-content/uploads/2018/06/240118-DAP-Cirtec_RARX_2021_01.pdf

5. LEGISLACIÓN

- DIRECTIVA 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. [Directiva Marco de Residuos].
- REAL DECRETO 712/2025, de 26 de agosto, de neumáticos al final de su vida útil.
- ORDEN CIRCULAR 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).
- ORDEN CIRCULAR 21bis/2009 sobre betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de NFU y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra.
- ORDEN FOM 2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos (BOE de 3 de enero de 2015)
- NOTA TÉCNICA NT 02/2020 Sustitución de un betún mejorado con caucho (BC) por la combinación de un betún de penetración y un aditivo de caucho en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.
- ORDEN TED/1522/2021, de 29 de diciembre, por la que se establecen los criterios para determinar cuándo el caucho granulado y el polvo de caucho, obtenidos del tratamiento de neumáticos fuera de uso y destinados a ciertas aplicaciones, dejan de ser residuos…
- LEY 7/2022. Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular.
- PROYECTO DE REAL DECRETO sobre los neumáticos fuera de uso y la gestión ambiental de sus residuos. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/230503borradornuevordnfu_tcm30-561745.pdf.
- PLAN ESTATAL MARCO DE GESTIÓN DE RESIDUOS (PEMAR) 2023-2035. https:\\www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/sgecocir/230705%20nuevo%20PEMAR_IP_Revisado.pdf

6. NORMATIVA TÉCNICA

- ASTM D6270-08$^{\varepsilon 1}$ (Reapproved 2009). Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications.
- ASTM D422-63 (Reapproved 2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM C 127–07 (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- NYSDOT.GOV (2008). Tire shreds in embankments (recomendaciones del Departamento de Transporte del Estado de Nueva York).

- UNE-EN 14243-1:2019. Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 1: Definiciones generales relativas a los métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas
- UNE-EN 14243-2:2019. Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo. Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre.
- UNE-EN 14243-3:2019. Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 3: Triturado, cortes y chip. Métodos para determinar sus dimensiones incluyendo dimensiones de filamentos salientes
- UNE-EN 17189:2018 Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil (NFVU). Determinación de la densidad real de los granulados. Método basado en la picnometría del agua

7. REFERENCIAS:

[1] ACCIONA INFRAESTRUCTURAS, IBERINSA & UPC (2006). Proyecto de rellenos de NFU troceados en terraplenes y muros.

[2] ETRMA (2011). New End-of-Life Tyres statistics for 2020 and 2021. https://www.etrma.org/news/new-end-of-life-tyre-statistics-2020-2021/

[3] SIGNUS (2024). Memoria SIGNUS 2023. https://www.signus.es/memoria2023/

[4] TNU (2024). Memoria TNU 2023. https://www.tnu.es/wp-content/uploads/memorias/memoria-tnu-2023.pdf

[5] LÓPEZ, F.A., CENTENO, T.A. & ALGUACIL, F.J. (2012). Aprovechamiento energético de residuos: el caso de los NFU. www.energia2012.es.

[6] LÓPEZ, J., SAIZ L. y PÉREZ R. (2022). Guía para el empleo de caucho reciclado procedente del neumático en la industria del caucho.

[7] PÉREZ R. y SAIZ L. (2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso. Revista de plásticos modernos Vol. 115 Número 730 Enero 2018

[8] MUNUERA J. (2008). Caracterización del comportamiento mecánico de neumáticos troceados. Tesina UPC . https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6419

[9] SAN MARTÍN, I. (2009). Caracterización de neumáticos fuera de uso troceados para su reciclado en obra civil. Tesina, UPC.

[10] CONTRERAS-MARÍN et al. (2021). Use of Granulated Rubber Tyre Waste as Lightweight Backfill Material for Retaining Walls. Appl. Sci. 2021, 11, 6159. https://doi.org/10.3390/app11136159

[11] ETRMA (2000). Tyre Recycling after 2000: Status and Options. París, March 2000.

[12] CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Monografía CEDEX, octubre 2007. ISBN 978-84-7790-450-2

[13] SÁNCHEZ, M. & GUZMÁN, M. (2013). Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos. Cátedra para la investigación y formación sobre neumáticos reciclados. Universidad Miguel Sánchez, Elche (Alicante). Editorial UMH, ISBN 978-84-96297-92-0.

[14] VICENTE J., PARRILLA A. y ESTAIRE J. (2022). Guidelines for the use of Shredded Tyres (ST) in earth-structures. 5th International Seminar on Earthworks in EuropeApril 21-22, 2022, Prague, Czech Republic

[15] RODRIGUEZ, R., CANO, H. & ESTAIRE, J (2012). Asesoramiento en el Proyecto "Incorporación de neumático troceado como materia prima en la construcción de rellenos". Caracterización geotécnica y medioambiental de una muestra de NFU troceados. Informe Parcial Nº2. *Laboratorio de Geotecnia, CEDEX*.

[16] RODRIGUEZ, R. & ESTAIRE, J. (2010). Geotechnical and Environmental Properties of Tire-used Shreds for Use in Civil Construction. *6th International Congress on Env. Geotechnics*. New Delhi (India), Nov. 2010. p. 986-991.

[17] ARROYO, M., ESTAIRE, J. SAN MARTÍN, I. & LLORET, A. (2008). Size effect on tire derived aggregate mechanical properties. Scrap Tire Derived Geomaterials - Opportunities and Challenges. *IW-TDGM 2007*, Yokosuka (Japón), Marzo 2007. Ed. Taylor & Francis. p. 151-160.

[18] TYRE STEWARDSHIP AUSTRALIA Ltd (ACN 164 971 939) (TSA). (2024). https://www.tyrestewardship.org.au/wp-content/uploads/2024/06/TSA-Life-Cycle-Assessments-of-end-of-life-tyres.pdf

[19] SANCHÍS ET AL. (2022). The role of temperature profile during the pyrolysis of end-of-life-tyres in an industrially relevant conditions auger plan. Journal of Environmental Management 317 (2022) 115323

[20] SIGNUS. (2014). Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático. ISBN: 978-84-616-9263-7 https://www.signus.es/wp-content/uploads/2017/06/Guia_betunes_signus_def.pdf

[21] SIGNUS. (2022). Manual de recomendaciones para el diseño y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de caucho por vía seca. ISBN: 978-84-09-38497-6

[22] LAKUSIC S., BJEGOVIC D., HALADIN I., BARICEVIC A. (2011). "Concrete Noise Barriers - new product from recycled waste tyres". The Eighteenth Annual Conference on Tyre Recycling Bruxelles, Belgija, 23.03.2011-25.03.2011

[23] MUNEEB Q., JUN L., CHENGQING W., DAICHAO S. (2024). "Mechanical strength of rubberized concrete: Effects of rubber particle size, content, and waste fibre reinforcement". Construction and Building Materials 444 (2024) 137868

[24] M.A. KAREEM , E.O. AJADI, O.O. FADIPE , K. ISHOL, O.A. OLAWUYI , S.A. AYANLERE , O.J. OLATOYAN , J.O. ADEOSUN , A.A. ADEFAJO , A.T. OYEWO , S.O.A. OLAWALE, W.A. LAMIDI. (2025). "Sustainability-driven application of waste steel and tyre rubber fibres as reinforcement in concrete: An optimization study using response surface methodology".

Next Materials Volume 7, April 2025, 100345

[25] M S, SANDEEP AND PANSUK, WITHIT AND LATCHAROTE, PANON AND NAGARAJAN, PRAVEEN AND RAMAN, SUDHARSHAN. (2024). Enhancing Sustainability and Ductility Performance of Deep Beams with Recycled Crumb Rubber and Steel Fibers. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=5033154 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5033154

[26] MANAN A., ZHANG P., ALATTYIH W., ALZARA M., AHMAD J. AND. YOSRI A. (2024). "Physical properties of recycled concrete powder and waste tyre fibre reinforced concrete". Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability 0 0:0, 1-14

[27] ONUAGULUCHI, O., & PANESAR, D. K. (2014). "Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume". Journal of Cleaner Production,Volume 82,2014,Pages 125-131,ISSN 0959-6526,https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.068.

[28] PAWELSKA-MAZUR AND KASZYNSKA. (2021). Mechanical Performance and Environmental Assessment of Sustainable Concrete Reinforced with Recycled End-of-Life Tyre Fibres. Materials 14(2), 256; https://doi.org/10.3390/ma14020256.

[29] POLYDOROU, T.; KYRIAKIDES, N.; LAMPROPOULOS, A.; NEOCLEOUS, K.; VOTSIS, R.; TSIOULOU, O.; PILAKOUTAS, K.; HADJIMITSIS, D.G. (2022). Concrete with a High Content of End-of-Life Tire Materials for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Structures. Materials 15, 6150. https://doi.org/10.3390/ma15176150.

[30] YOUSSF O. MILLS J., ELLIS M., BENN T., ZHUGE Y., MA X., GRAVINA R. (2022). Practical Application of Crumb Rubber Concrete in Residential Slabs. Structures, Volume 36, 2022, Pages 837-853, ISSN 2352-0124, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.062

[31] ISLAM, M. M. U., LI, J., WU, Y., ROYCHAND, R., & SABERIAN, M. (2022). "Design and strength optimization method for the production of structural lightweight concrete: An experimental investigation for the complete replacement of conventional coarse aggregates by waste rubber particles" Resources, Conservation & Recycling Journal (DOI:10.1016/j.resconrec.2022.106390).

[32] GUIÑEZ F., SANTA MARÍA H., ARAYA-LETELIER G., LINCOLEO L., AND PALOMINOS F. (2024). Effect of mix dosage on rubberized concrete mechanical performance: A multivariable prediction model towards design provisions. Journal of Building Engineering 90:109451. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109451.

[33] INCE C. MAHMOUD B., SHEHATA H. DEROGAR S.,BALL R. (2022). "Towards the development of sustainable concrete incorporating waste tyre rubbers: A long-term study of physical, mechanical & durability properties and environmental impact". Journal of Cleaner Production. Volume 334,1 February 2022, 130223

[34] SIGNUS. (2024). Guía de aplicaciones del Caucho Reciclado procedente del Neumático en las Ciudades. ISBN: 978-84-09-62659-5

[35] SIGNUS. (2018). 20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/10/20-a%C3%B1os-mezclas-

asfalticas-con-polvo-de-neumatico-en-carreteras.pdf

[36] HAN ET AL. (2024). "Sustainable transformation of end-of-life tyres into value-added products using thermochemical processes". Carbon Research (2024) 3:73 https://doi.org/10.1007/s44246-024-00167-4

[37] PARDO DE SANTAYANA. (2020). "Estudios sobre utilización de residuos en terraplenes de carreteras". Revista Ingeniería Civil. Num. 16

[38] LÓPEZ, F.A., CENTENO, T.A., ALGUACIL, F.J. & LOBATO, B. (2011). Distillation of granulated scrap tire in a pilot plant. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 190 (1-3), p. 285-292.

[39] LÓPEZ, F.A., CENTENO, T.A., ALGUACIL, F.J. & LOBATO, B. (2013). The GRAUTHERMIC Tyres process for the recycling of granulated scrap tyres. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 103, p. 207-215.

[40] TANDON, V., VELAZCO, D.A., NAZARIAN, S. & PICORNELL, M. (2007). Performance monitoring of embankments containing tire chips. *Journal of Performance of constructed Facilities*, vol. May/June 2007, p. 207-214.

[41] YOON, S., PREZZI, M., SIDDIKI, N.Z. & KIM B. (2006). Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material. *Waste Management*, vol. 26, p. 1033-1044.

[42] HUMPHREY, D.N. (2004). Effectiveness of design guidelines for use of tire derived aggregate as lightweight embankment fills. Geotechnical Special publications. *Recycled Materials in Geotechnics*. p. 61-74.

[43] BOSSCHER, P.J., EDIL, T.B. & KURAOKA, S. (1997). Design of highway embankments using tire chips. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, vol. April, p. 295-304.

[44] EDESKÄR, T. (2006). Use of tyre shreds in civil engineering applications. Technical and environmental properties. Doctoral thesis. *Deparment of Civil and Environmental Engineering*, Lulea University of Technology.

[45] ZORNBERG, J.G., COSTA, J.D. & VOLLENWEIDER, B. (2004). Performance of prototype embankment built with tire shreds and nongranular soil. *Transportation Research record: Jrnal of the Transportation Research Board*, vol. 1874, p. 70-77.

[46] TRB (2001). Appropriate Use of Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry - An information Database. *National Cooperative Highway Research Program*, Project 4-21. Washington, DC.

[47] FORSYTH, RAYMOND, A. & JOSEPH P. E., JR. (1976). Use of Waste Materials in Embankment Construction, *Transportation Research Record,* nº 593. TRB. Washington, DC, 1976.

[48] CETIN, H., FENER, M. & GUNAYDIN, O. (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material. *Engineering Geology*, vol. 88, p. 110-120.

[49] HATF, N. & RAHIMI, M.M (2006). Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds. *Construction and Building Materials*, vol. 20, p. 910-916.

[50] VENKATAPPA, G. & DUTTA, R.K. (2006). Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Geotech. and Geol. Engineering*, vol. 24, p. 711-724.

[51] RODRIGUEZ, R., CANO, H. & ESTAIRE, J (2011). Terraplén experimental construido con neumáticos troceados. *Jornada Técnica sobre Experiencias recientes en estructuras de Tierra para Infraestructuras Viarias*. Madrid, febrero 2011.

[52] RODRIGUEZ, R., CANO, H. & ESTAIRE, J (2010). Ficha de Actuación Nº11 "Terraplenes ejecutados con NFU sobre suelos blandos". Experiencias de Laboratorio de Geotecnia en la ejecución de rellenos viarios con NFU. Informe Parcial Nº1, Tomo Único. *Laboratorio de Geotecnia, CEDEX*.

[53] RODRIGUEZ, R., CANO, H. & ESTAIRE, J (2012). Ficha de Actuación Nº11 "Terraplenes ejecutados con NFU sobre suelos blandos". Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con neumáticos fuera de uso troceados. Informe Final. *Laboratorio de Geotecnia, CEDEX*.

[54] HUMPHREY, D.N. & TWEEDIE, J.J. (2002). Tire shreds as lightweight fill for retaining walls: result of full scale field trials. *Proc. of the Workshop on Lightweight Geomaterials*. Tokio, Japón.

[55] LEE, J.H., SALGADO, R. BERNAL, A & LOVELL, C.W. (1999). The use of recycled tire chips to minimize dynamic Earth pressure during compaction of backfill. *Construction and Building Materials*, vol. 21, p. 1016-1026.

[56] POH, P.S.H. & BRONMS, B.B. (1995). Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles. *Journal of Constructed Facilities*, vol. 9, p. 76-79.

[57] CAO, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Mat.*, vol. 21, p. 1011-1015.

[58] KHATIB, Z.K. & BAYOMY, F.M. (1999). Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, nº3, p. 206-213.

[59] LI, Z., LI, F. & LI, J.S.L. (1998). Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. *Magazine of Concrete Research*, vol. 50, nº4, p. 297-304.

[60] TOPCU, I. B. & AVCULAR, N. (1997). Collision Behaviours of Rubberized Concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 27, nº 12, p. 1893-1898.

[61] ELDIN, N. & SENOUCI, A.B. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 5, nº4, p. 478-496.

[62] Cal.GOV (2006). http://www.calepa.ca.gov/publications/Reports/AP2000A/CIWMB.htm

[63] ALIAPUR (2005). Utilisation des pneumatiques usagés entiers ou broyés en basin de rétention d´eaux pluviales.

[64] ALIAPUR (2005). Caractéristiques et propriétés techniques des pneumatiques usages dans le cadre d´utilisations en génie civil.

[65] ALIAPUR (2005). Utilisation des pneumatiques usagés entiers ou broyés en centres de

stockage de déchets.

[66] GALLEGO, J. & DE LOS SANTOS (2004). Mezclas bituminosas con alto contenido de caucho de neumáticos: tecnología, fabricación y comportamiento. Asociación Española de la Carretera. *Actas del VI Congreso Nacional de Firmes.* León, 2004. p. 613-626.

[67] CIWMB (1998). Tire shreds as final cover foundation layer material at municipal solid waste landfills. Guidance Manual. *California Integrated Waste Management Board*. Sacramento, California.

[68] CIWMB (1998). Tire shreds as gas collection material at municipal solid waste landfills. Guidance Manual. *California Integrated Waste Management Board*. Sacramento, California.

[69] CIWMB (1998). Tire shreds as leachate drainage material at municipal solid waste landfills. Guidance Manual. *California Integrated Waste Management Board*. Sacramento, California.

[70] RACTC (2007). Inspection of rubberized asphalt concrete: a field guide for the construction inspector. Rubberized Asphalt Concrete Technology Center, University of California, USA. Sept. 2007.

[71] TOMÁS RAZ, R. (2001). Reutilización de neumáticos usados en la construcción de carreteras. *Jornada sobre utilización de residuos en la construcción de carreteras*. Madrid, marzo, 2001.

[72] BRELCHA CARDELÚS, R. (2001). Experiencia con el aprovechamiento de neumáticos en Cataluña. *Jornada sobre utilización de residuos en la construcción de carreteras*. Madrid, marzo 2001.

[73] VÁZQUEZ, I., RAMONICH, E. & RUBIO GUZMAN, B. (1998). Mezcla bituminosa con polvo de neumáticos. Tramo de ensayo en la carretera B140. *I Congreso Andaluz de Carreteras*. Granada, 1998.

[74] RAMÓN MONCHO, J.A. (2000). Utilización de betunes modificados con polvo de caucho en capas de rodadura en la red secundaria de carreteras de Andalucía. *II Congreso Andaluz de Carreteras*. Cádiz, 2000.

[75] CASADO MARTÍNEZ, C. (1998). Utilización de caucho reciclado procedente de neumáticos en la polimerización de betunes para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente (vía húmeda). *I Congreso Andaluz de Carreteras,* Granada, 1998.

[76] GALLEGO, J.; TOMÁS, R.; DEL VAL, M.A. (1998). Aprovechamiento de neumáticos usados en la fabricación de mezclas asfálticas. *IV Simposio Español sobre Carreteras y Medio Ambiente*. Torremolinos (Málaga), 1998.

[77] GALLEGO, J. & DEL VAL, M.A. (1998). Efecto del empleo de caucho de neumáticos usados por vía seca en las características de mezclas bituminosas en caliente. *I Congreso Andaluz de Carreteras*. Granada, 1998.

[78] MORENO BENÍTEZ, J.F. (1998). Estudio de la utilización de aglomerado asfáltico con polvo de caucho procedente de NFU en el refuerzo de la Autovía A-92. *IV Simposio Español sobre*

Carreteras y MM.AA. Torremolinos (Málaga), 1998.

[79] GALLEGO, J., TOMÁS R. & DEL VAL, M.A. (1996). Neumáticos usados. Un residuo útil en la pavimentación de carreteras, *Ingeopres,* nº 45. Madrid, 1996.

[80] GONZÁLEZ HERRERA, D. (1996). Estudio sobre el diseño y construcción de mezclas bituminosas en caliente con granos de caucho reciclado empleando husos granulométricos españoles. Tesis Doctoral. *Universidad Politécnica de Cataluña*. Barcelona, 1996.

[81] BOTELLO, F., GUEDELLA, E., DOMINGO, A. & DEL AMO, E. (2008). Empleo de NFU triturados como relleno de terraplén: aplicación en la obra "Duplicación de la Carretera M-111 y Variante de Fuente el Saz". *Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, vol. 127, p. 42-47.

[82] BOTELLO, F. & GUEDELLA, E. (2009). Utilización de NFU troceados en terraplenes: vía de servicio y modificación de enlaces San Isidro-Aeropuerto Sur (Tenerife). *Jornadas de Construcción Sostenible y Reciclaje de Residuos*, Universidad de Zaragoza, abril 2009. p. 183-187.

[83] MOO-YOUNG, H., SELLASIE, K. ZEROKA, D. & SABNIS, G. (2003). Physical and Chemicals properties of recycled tire shreds for use in construction. *Journal of environmental Engineering*, vol. 129, p. 921-929.

[84] HUMPHREY, D.N., KATZ, L.E. & BLUMENTHAL, M. (1997). Water Quality effects of tire chip fills placed above the groundwater table. Testing soil mixed with waste or recycled materials. *ASTM STP 1275*, p. 299-313.

[85] HUMPHREY, D.N. (1996). Investigation of exothermic reaction in tire shred fill located on SR 100 in Ilwaco (Washington). *Report Federal Highway Administration*, Washington, D.C.

[86] GARGA, V.K. & O´SHAUGHNESSY, V. (2000). Tire-reinforced earthfill. Part 3: *Environmental Assessment. Canadian Geotechnical Journal*, vol.37.

[87] RONCHACK, A. (1990). A report on the environmental study of the use of shredded waste tires from railway sub-grade support. Minnesota Pollution Control Agency, Waste Tire Management Unit, Site Response section, Groundwater and Soil Waste Division, *Minnesota Pollution Control Agency*.

[88] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1997). Interim Design Guidelines to Minimize Internal Heating of Tire Shred Fills.

[89] RINCK, G. & NAPIER, D. (1991). Exposure of Paving Workers to Asphalt Emissions (when Using Asphalt-rubber Mixes). *Asphalt Rubber Prod. Group*. 1991.

[90] SIGNUS (2017). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. ISBN: 978-84-697-2998-4

[91] SIGNUS (2019). Mezclas semicalientes con polvo de caucho procedente del neumático al final de su vida útil. ISBN: 978-84-09-11306-4

[92] CONTRERAS E. (2022). Caracterización de materiales reciclados: parámetros geotécnicos del granulado de neumático fuera de uso (NFU´s). Tesis Doctoral Universidad de Sevilla,

Departamento de Estructuras de la Edificación e Ingeniería del Terreno.

8. ENTIDADES DE CONTACTO

- SIGNUS Ecovalor. www.signus.es
- TNU. www.tnu.es
- EUROPEAN TYRE RECYCLING MANUFACTURERS ASSOCIATION (ETRMA).
  2 Avenue des Arts, box 12 • B-1210 Brussels
  Tel. +32 2 218 49 40, Fax +32 2 218 61 62
  e-mail: info@etrma.org
  http://www.etrma.org/
- Centro de Estudios y Experimentación del Obras Públicas
  C/ Alfonso XII 3 y 5, 28014 Madrid
  info@cedexmateriales.es

AGRADECIMIENTOS

El CEDEX desea expresar su agradecimiento a SIGNUS y TNU por su colaboración y apoyo durante la elaboración del presente documento.

www.cedex.es

Síguenos en:

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
CEDEX