

NOTA TÉCNICA NT 03/2020

Sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos

Conseguir una economía circular es una cuestión prioritaria medioambiental, económica y socialmente. Dentro del marco de Europa 2020, una de las principales estrategias es iniciar el camino hacia "Una Europa que utilice eficazmente los recursos", en la cual se enmarca el denominado concepto de "economía circular", que pretende impulsar el cambio de la actual economía lineal de extracción, fabricación, utilización y eliminación, hacia un nuevo modelo circular que utiliza y optimiza los acopios y los flujos de materiales, energía y residuos y cuyo objetivo final es la eficiencia del uso de los recursos.

Uno de los principales hitos en la promoción del concepto de "economía circular" fue la adopción de un paquete de medidas a este respecto denominado "Plan de Acción de la Unión Europea para la Economía Circular" el 2 de diciembre del año 2015, que pretende incidir sobre todo el ciclo de vida de los productos, desde el diseño hasta su residuo y su reintegro en el mercado como una nueva materia prima. De esta forma, además de participar de una sociedad más sostenible e impulsar la creación de empleo, el crecimiento económico y la inversión, se actúa positivamente en relación con el cambio climático y el medio ambiente.

En este sentido, el 26 de enero de 2017, la Comisión Europea redactó el primer informe de resultados sobre la implementación del Plan de Acción en Economía Circular, el cual incluye orientaciones a los Estados miembros sobre, entre otros, la reintroducción de los residuos en el mercado.

Por lo tanto, en consonancia con los objetivos estratégicos de la Unión Europea, así como de conformidad con lo dispuesto en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, la valorización de los residuos de los procesos industriales tales como los áridos siderúrgicos, que en algunos casos presentan



características muy similares a ciertas materias primas, es una práctica que necesita ser promovida, para resolver así una de las principales problemáticas en su gestión, evitando de este modo su eliminación o acumulación en vertederos y la extracción de los recursos naturales alternativos.

La incorrecta interpretación de que los áridos siderúrgicos no están recogidos en el vigente Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), está provocando en algunos casos la desestimación del uso de este material en proyectos y obras, y a reparos sobre su utilización en las actividades de supervisión de proyectos, lo que incide de forma negativa en la Estrategia Española de Economía Circular, España Circular 2030¹.

El objeto de esta Nota Técnica es aclarar dicha interpretación y dar algunas directrices técnicas sobre el empleo de este material, en especial en el campo de las mezclas bituminosas donde su utilización como árido en capa de rodadura puede ser una clara alternativa.

A título orientativo se incluye como anexo una propuesta sobre cómo recoger de una forma más detallada el empleo de árido siderúrgico en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de diversos tipos de mezclas bituminosas.

Este documento ha sido redactado por técnicos de la Dirección General de Carreteras:

Julio Vaquero García, ICCPE, Dirección Técnica

Jose Manuel Blanco Segarra, ICCPE, Demarcación CE en Extremadura

Javier Payan de Tejada, ICCPE, Demarcación CE en Castilla y León Occidental

Ha sido aprobado por M^a Rosario Cornejo Arribas, ICCPE Directora Técnica de la Dirección General de Carreteras en diciembre de 2020.

¹<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia/>



1 Regulación de los áridos artificiales en el vigente PG-3 y en la normativa técnica de la Dirección General de Carreteras

La parte 5 sobre Firmes y Pavimentos del vigente PG-3 contempla la utilización de áridos artificiales y/ o áridos siderúrgicos, en los artículos que se relacionan a continuación, así como en la Orden Circular 3/2019, habiéndose transcrito los apartados y epígrafes en los que se hace referencia a ellos.

En todos estos casos, se debe considerar que en la referencia a áridos artificiales están incluidos los áridos siderúrgicos.

NOTA: En ocasiones se interpreta, erróneamente, que la referencia a árido artificial alude a aquellos áridos de procedencia natural que han experimentado algún tratamiento de machaqueo, clasificación o limpieza. El árido artificial es todo aquel que, no existiendo en la naturaleza, surge como consecuencia de la actividad humana, generalmente asociada a un proceso industrial.

Para aclarar el tema, se recogen a continuación algunas definiciones, generalmente aceptadas, para los áridos:

- Árido natural es el que procede de la explotación de un yacimiento y que ha sido sometido únicamente a procesos mecánicos.
- Árido artificial es el procedente de un proceso industrial y ha sido tratado mediante alguna modificación físico-química o de otro tipo.
- Árido reciclado es el que resulta del reciclaje de residuos de demoliciones o construcciones y de escombros.

1.1 Ahorras (Art. 510)

510.2.2.1 Características generales

.../...

Para las categorías de tráfico pesado T2 a T4 se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos reciclados de residuos de construcción y demolición —entendiendo por tales a aquellos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción—, **áridos siderúrgicos**, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de diciembre de 2008, por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.



Los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición se someterán, en centrales fijas o móviles, a un proceso de separación de componentes no deseados, de cribado y de eliminación final de contaminantes. De igual manera, los **áridos siderúrgicos**, tras un proceso previo de enfriado, machaqueo, cribado y eliminación de elementos metálicos y otros contaminantes, se envejecerán con riego de agua durante un periodo mínimo de tres (3) meses.

.../...

El **árido siderúrgico** de acería deberá presentar una expansividad inferior al cinco por ciento (< 5%) (norma UNE-EN 1744 1). La duración del ensayo será de veinticuatro horas (24 h) cuando el contenido de óxido de magnesio (norma UNE-EN 196-2) sea menor o igual al cinco por ciento ($MgO \leq 5\%$) y de ciento sesenta y ocho horas (168 h) en los demás casos. Además, el Índice Granulométrico de Envejecimiento (IGE) (NLT-361) será inferior al uno por ciento (< 1%) y el contenido de cal libre (UNE-EN 1744-1) será inferior al cinco por mil (< 5‰).

NOTA: A pesar de lo indicado en el artículo 510 del PG-3 en relación al periodo mínimo de envejecimiento con agua de tres meses, se quiere apuntar que se ha observado que este aspecto no es relevante y que el periodo necesario vendrá establecido por los resultados de los ensayos de expansión.

En la mayoría de los casos, el aspecto más relevante para reducir este tipo de fenómenos expansivos es el procedimiento de enfriamiento utilizado, proceso que se ha ido optimizando en los últimos años.

510.2.2.3.4 Resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles)

.../...

Para materiales reciclados procedentes de capas de firme de carretera, así como para **áridos siderúrgicos**, el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior en cinco (5) unidades a los valores que se exigen en la tabla 510.2, siempre y cuando su composición granulométrica esté adaptada al huso ZAD20, especificado en la tabla 510.4.

510.9.1 Control de procedencia del material

Los áridos, naturales, **artificiales** o procedentes del reciclado, deberán disponer del marcado CE, según el Anejo ZA de la norma UNE-EN 13242, con un sistema de evaluación de la conformidad 2+, salvo en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011).

.../...



1.2 Microaglomerados en frío (Art. 540)

540.2.3.1 Características generales

Los áridos a emplear podrán ser naturales o **artificiales** siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

.../...

1.3 Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (Art. 542)

542.2.3.1 Características generales

Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas podrán ser de origen natural, **artificial** o reciclado siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.

.../...

1.4 Mezclas bituminosas para capas de rodadura (Art. 543)

543.2.3.1 Características generales

Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas discontinuas y en las drenantes podrán ser naturales o **artificiales** siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.

.../...

1.5 Mezclas bituminosas tipo SMA (OC 3/2019)

544.2.3.1 Características generales

Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas tipo SMA podrán ser de origen natural o **artificial** (como, por ejemplo, las **escorias siderúrgicas**) siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.

.../...

1.6 Pavimentos de hormigón (Art. 550)

550.2.4 Áridos

550.2.4.1 Características generales

.../...



En la capa inferior de pavimentos bicapa se podrán utilizar materiales granulares reciclados, **áridos siderúrgicos**, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de diciembre de 2008, por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

.../...

550.2.4.2 Árido grueso

550.2.4.2.1 Características generales

.../...

El coeficiente de Los Ángeles (norma UNE-EN 1097-2) deberá ser inferior a treinta y cinco ($LA < 35$). Cuando en la capa de hormigón inferior de los pavimentos bicapa se empleen materiales reciclados procedentes de capas de aglomerado de firmes de carretera, de demoliciones de hormigones de resistencia a compresión final superior a treinta y cinco megapascuales (> 35 MPa), o **áridos siderúrgicos**, se admitirá para ellos un valor del coeficiente de Los Ángeles inferior a cuarenta ($LA < 40$).

.../...

1.7 Hormigón magro vibrado (Art. 551)

551.2.4 Áridos

551.2.4.1 Características generales

En este artículo, los epígrafes referentes a las características generales de los áridos (551.2.4.1), y específicamente de los áridos gruesos (551.2.4.2), tienen el mismo contenido que en el artículo 550, en lo referente a la utilización de áridos siderúrgicos

.../...



2 Áridos siderúrgicos

El árido siderúrgico es un árido artificial obtenido tras un adecuado tratamiento (trituración, clasificación y desferretización²) de las escorias valorizables procedentes del proceso siderúrgico.

La escoria de la industria siderúrgica es un residuo procedente de:

- la fabricación de arrabio a partir de mineral de hierro en hornos altos,
- de la producción de acero, mediante afinado de arrabio en hornos convertidores,
- de la producción de acero a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico.

2.1 Tipos y características

En función de su origen y de los tratamientos utilizados se obtienen distintos tipos de escoria, con distintas propiedades y aplicaciones. A continuación, se describen los tipos más habituales.

2.1.1 Escorias de horno alto

Dependiendo de su enfriamiento, las escorias de horno alto o BFS (*Blast Furnace Slag*), se dividen en los siguientes tipos:

- Escorias cristalizadas o escorias ABS (*Air cooled Blast Slag*), resultado de un enfriamiento lento que tiene lugar en las fosas de apagado, lo que hace que una parte de ellas quede en estado cristalino. Es un material pétreo de características similares a las rocas ígneas.
- Escorias granuladas o escorias GBFS (*Granulated Blast Furnace Slag*), obtenidas al enfriar rápidamente con agua la escoria fundida. Es un material arenoso y friable con puzolanidad latente, es decir, con capacidad para fraguar ante la presencia de un agente activador.
- Escorias peletizadas y escorias expandidas, como resultado de una variación del proceso de enfriamiento rápido con agua en el que se genera un material ligero en forma de pellets³ o en forma de espuma

² En las etapas del tratamiento de machaqueo y clasificación de la escoria, antes del pre-cribado y después de la trituración primaria, se efectúa el tratamiento de desferretización con la ayuda de electroimanes con el objeto de recuperar el acero susceptible de ser reutilizado, prevenir daños en los equipos de trituración y mejorar la homogeneidad y calidad del árido siderúrgico. Por separación magnética puede recuperarse acero en proporciones que alcanzan el 10% en peso de la escoria procesada, que se devuelve a la acería y retorna al ciclo productivo.

³ La escoria pelletizada se caracteriza por estar formada por partículas de forma redondeada y textura lisa, con baja porosidad y capacidad de absorción de agua. El tamaño de los pellets puede estar comprendido entre 0,1 mm y 13 mm, siendo más habitual los valores comprendidos entre 1 mm y 9,5 mm. Su densidad aparente es de 0,85 t/m³.



expandida, que tras un proceso de machaqueo proporciona un árido ligero.

Las escorias cristalizadas (ABS) presentan una elevada capacidad portante y pueden usarse en rellenos, mejora de suelos y como capas de base o sub-base en firmes⁴. Existen experiencias también de su empleo como áridos para hormigones.

Como referencia, la densidad real de las escorias cristalizadas es del orden de 2,60 t/m³ y su densidad aparente de 2,35 t/m³. La gran porosidad del material, en general por encima del 20%, favorece las condiciones de drenaje.

Las escorias granuladas (GBFS) tienen propiedades puzolánicas. Se emplean para la fabricación de cementos siderúrgicos, caracterizados por su elevada durabilidad y bajo calor de hidratación, y para la fabricación de conglomerantes hidráulicos para carreteras HRB (*Hydraulic Road Binders*) muy indicados para tratamientos de suelos con elevados contenidos en carbonatos. Finamente molidas se emplean como adición al hormigón, pudiendo sustituir en parte al contenido de cemento. En forma granulada se emplean como conglomerante en grava-escorias, empleándose en general un agente activante (sosa, cal) para incrementar la velocidad de endurecimiento.

2.1.2 Escorias de horno de convertidor

Las escorias BOFS (*Basic Oxygen Furnace Slag*), se originan durante el proceso de afino del arrabio obtenido en el horno alto en un horno de convertidor. Se obtienen en forma de partículas grisáceas de aspecto pétreo, con dimensiones máximas que alcanzan los 300 mm y de mayor densidad que los áridos naturales (> 3 t/m³). Su absorción es moderada (< 3%), tienen muy buena angulosidad, elevada dureza (6-7 en la escala de Mohrs) y elevada resistencia al corte y a la abrasión.

La presencia de cal libre y/o magnesia (1-15%), constituye un factor potencial de inestabilidad. Estos óxidos tienden a hidratarse produciendo un fenómeno de hinchamiento que tiende a disgregar al material y que puede producirse en el transcurso de unas pocas semanas o de varios meses. Por ello, es necesario llevar a cabo un proceso de estabilización, conocido como envejecimiento de la escoria, consistente en su machaqueo hasta estado final, para dividir las partículas del árido y dejar expuestos posibles nódulos internos expansivos, que se hidratan regando los acopios (con alturas máximas de 1,5 – 2 m) con agua.

NOTA: Se ha comprobado que el envejecimiento al aire sin riego de agua no ofrece garantías de que se haya completado este proceso.

⁴ Su aplicación dependerá de la resistencia de la escoria evaluada a través del ensayo de Los Ángeles.



2.1.3 Escorias de horno eléctrico

Las escorias de horno eléctrico, también llamadas “escorias negras”, se obtienen durante la etapa de fusión como un material espumante que flota sobre el acero fundido recogiendo las impurezas y los materiales de menor densidad. Presentan características que las asemejan a las escorias ABS, pero con una tonalidad más oscura.

En el subsiguiente proceso de afino, que tiene lugar en el horno de cuchara, se obtienen las denominadas “escorias blancas”, de color mucho más claro y aspecto arenoso.

Las escorias blancas, altamente expansivas, se emplean fundamentalmente en la industria del cemento y no son aptas para su empleo directo en firmes de carreteras.

Las escorias negras son las de mayor dureza, densidad, resistencia a la abrasión y desgaste, lo que las hace muy adecuadas para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas, compensando las desventajas de su mayor densidad (3,3 t/m³ - 3,7 t/m³).

La absorción de agua de la escoria negra suele estar comprendida entre 1% - 4% en volumen. Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles entre 15% - 25%, y con un coeficiente de pulimento acelerado (PSV) comprendido entre 0,50 y 0,60 lo que las hace aptas para mezclas bituminosas en capas de rodadura.

Debido a la presencia de óxidos de cal y magnesio libres en su composición, las escorias negras de acería tienen naturaleza expansiva, quizás en menor medida que las escorias de horno de convertidor, pero que en cualquier caso requieren de un proceso de enfriamiento y tratamiento adecuado para garantizar su estabilidad.

NOTA: Está expresamente prohibida la mezcla de escorias negras y blancas para su empleo como material granular en cualquiera de los elementos que constituyen la estructura de un firme de carreteras. La detección de la presencia de escoria blanca en cualquier lote suministrado a la obra debe suponer el rechazo de todo el material de la misma procedencia, así como del suministrador de este material.

2.2 Utilización

Para cualquiera de los posibles empleos contemplados en el PG-3 (ver apartado 1 de esta Nota Técnica) es preceptivo que el árido siderúrgico esté en posesión del marcado CE correspondiente. De esta forma, se tiene una garantía de que no se está empleando un residuo cualquiera, sino un material que ha sido objeto de un procesamiento completo (machaqueo, clasificación, envejecimiento, caracterización...), para obtener un material/producto apto para su empleo en obras de carretera.

A continuación, se desarrolla en detalle el uso de árido siderúrgico en mezclas bituminosas.

2.2.1 Diseño de mezclas bituminosas

El empleo de áridos siderúrgicos en mezclas bituminosas se remonta a 1960⁵. La experiencia acumulada ha permitido acreditar un excelente comportamiento y la ausencia de problemas de durabilidad. En particular, las mezclas bituminosas para capas de rodadura elaboradas con este tipo de árido artificial ofrecen superficies con elevados niveles de adherencia.

En general, las mezclas bituminosas con árido siderúrgico se diseñan del mismo modo que el resto de mezclas y no presentan problemas para cumplir las especificaciones. Combinan estabilidades elevadas con viscosidades adecuadas para obtener una buena compactación en obra y, una vez frías, proporcionan una gran resistencia a las deformaciones plásticas. El carácter básico del árido siderúrgico las hace muy resistentes a la desenvuelta del betún por la acción del agua.

La diferencia de densidades entre áridos naturales y siderúrgicos debe ser tenida muy en cuenta en el diseño de mezclas, pues ciertas simplificaciones habituales, que pueden justificarse cuando se utilizan áridos naturales, resultan inasumibles en el caso de mezclas bituminosas elaboradas total o parcialmente con áridos siderúrgicos. También la forma cavernosa del árido siderúrgico, como su textura superficial, difieren significativamente de las típicas de los áridos naturales.

2.2.1.1 Selección de materiales

La mejor opción del empleo de árido siderúrgico en mezclas bituminosas es la de su fracción gruesa y, siempre que sea posible, en capas de rodadura de espesores reducidos. En estos casos, los mayores costes derivados del transporte de un material más denso o que pueda tener una mayor demanda de ligante, se ven compensados con unas altas prestaciones ante el desgaste por la acción del tráfico. En este sentido existen experiencias en la Red de Carreteras del Estado con mezclas tipo discontinuas (BBTM) y ultra delgadas (AUTL) para

⁵ Las primeras experiencias de mezclas bituminosas con árido siderúrgico se remontan a los años 60 del pasado siglo, cuando la compañía británica Steelphalt utilizó escorias envejecidas durante un año, procedentes de las acerías British Steel Corporation ubicadas en Rotherham y Scunthorpe. También en los años 60 Levy Company, en los Estados Unidos, empleó escorias siderúrgicas para producir mezclas bituminosas abiertas, con un tamaño máximo de 9,5 mm, en diversas áreas industriales. En 1969 hay aplicaciones documentadas en el área de Hamilton-Toronto (Canadá), donde en 1974 se construyeron varios tramos experimentales en la autopista 401 Toronto-Quebec, en concreto en la circunvalación norte de Toronto, en el marco de un programa de investigación de cuatro años de duración, destinado a mejorar las condiciones de seguridad de circulación en las autopistas canadienses. Los resultados obtenidos mostraron que en los pavimentos con árido siderúrgico se alcanzaban los mayores coeficientes de rozamiento y que la tasa de accidentalidad en pavimentos mojados apenas variaba con relación a la correspondiente a pavimentos secos, al contrario de lo que sucedía en las superficies pavimentadas con áridos naturales.



categorías de tráfico pesado T0 y T00 y mezclas tipo Hormigones Bituminosos (AC) para el resto de categorías de tráfico pesado.

La combinación de árido grueso siderúrgico con árido fino calizo suele ser la mejor opción, aunque no deben descartarse otras posibilidades o campos de aplicación. Mediante un correcto diseño de mezclas es posible incorporar elevadas proporciones de árido siderúrgico en cualquier tipo de mezcla bituminosa.

2.2.1.2 Composición granulométrica

Dada la importante diferencia de densidades entre el árido natural y el árido siderúrgico es imprescindible que la composición granulométrica se determine de forma volumétrica y nunca de forma ponderal.

Una vez obtenida la curva de trabajo mediante las composiciones granulométricas habituales, las proporciones volumétricas calculadas pueden convertirse en ponderales utilizando como factor de corrección la densidad aparente de partículas (UNE-EN 1097-6) de cada fracción de árido y polvo mineral.

2.2.1.3 Compactación de probetas en laboratorio

No es preciso prever modificación alguna en el proceso de fabricación de probetas en laboratorio cuando se diseñan mezclas bituminosas con árido siderúrgico.

Sí debe tenerse presente que cuando se utilizan áridos con porosidades elevadas es especialmente relevante cuidar los tiempos de acondicionamiento de la mezcla bituminosa a las temperaturas de inicio de compactación.

Dado que la absorción de betún progresa, principalmente, mientras la mezcla permanece a temperaturas elevadas, el tiempo de acondicionamiento debe ser similar al que se empleará en la práctica en las operaciones de transporte, puesta en obra y compactación de la mezcla bituminosa con árido siderúrgico.

2.2.1.4 Diseño de la mezcla

La incorporación de árido siderúrgico incrementa la estabilidad y reduce la deformación Marshall de las mezclas bituminosas por lo que las especificaciones al respecto, en su caso, son satisfechas sin dificultad.

El uso de árido siderúrgico no debe modificar los criterios volumétricos de diseño (huecos en mezcla o espesor de película de ligante, por ejemplo), pero da lugar a proporciones ponderales distintas de las típicas de las mezclas bituminosas producidas con áridos naturales, cualquiera que sea la metodología seguida para determinar el contenido óptimo de ligante. El análisis volumétrico debe considerar todos los aspectos necesarios para verificar que las dosificaciones ponderales obtenidas, aunque distintas de las habituales, son correctas.



Las propiedades volumétricas relativas a betún absorbido y espesor de película de ligante son de gran interés porque se relacionan con la durabilidad de la mezcla. Un reducido espesor de película de ligante da lugar a mezclas pobres, con poca cohesión, y cuyo ligante se oxida más rápidamente, envejeciendo y fragilizando la mezcla bituminosa. La sensibilidad al agua de la mezcla también depende del espesor de película de ligante, pues el agua desplaza el betún y provoca la desenvuelta de los áridos más fácilmente cuanto menor es este espesor.

Puesto que el espesor teórico de la película de ligante es el resultado de dividir el volumen de betún que envuelve las partículas de áridos por la superficie de la mezcla de áridos, se comprende que debe calcularse haciendo uso del betún efectivo, es decir, restando del betún total el betún absorbido. Así pues, los contenidos de betún de mezclas bituminosas elaboradas con áridos de distinta naturaleza y densidad deben compararse volumétricamente y en términos de betún efectivo. Este es el modo más correcto de medir el volumen de betún que realmente contribuye a la durabilidad de la capa bituminosa.

El análisis volumétrico de la mezcla bituminosa diseñada permite medir el alcance de esta absorción y seleccionar con mejor criterio el contenido óptimo de ligante de una mezcla bituminosa con árido siderúrgico.

Una vez determinado el contenido óptimo de ligante debe procederse a comprobar la respuesta de la mezcla frente a la acción del agua y su resistencia a las deformaciones plásticas.

La experiencia demuestra que el uso de árido siderúrgico mejora la respuesta en ambos casos. La sensibilidad al agua se reduce gracias al carácter básico de la escoria y al anclaje del betún a la superficie más áspera de sus partículas, favorecido por la presencia de porosidad accesible. Por su parte, la resistencia a las deformaciones plásticas aumenta como consecuencia del elevado ángulo de rozamiento interno que presenta el árido siderúrgico.

2.2.1.5 Verificación con mezcla fabricada en central

Como en el caso de las mezclas con áridos convencionales, son diversos los factores que pueden dar lugar a diferencias significativas entre la mezcla bituminosa de laboratorio y la producida en la central de fabricación, aun empleando las mismas temperaturas de envuelta y compactación, y después de haber reproducido con exactitud su composición volumétrica:

- Los procesos de calentamiento de áridos y ligante, así como las energías y tiempos de mezclado empleados en laboratorio y en la central de fabricación son muy diferentes y pueden dar lugar a envueltas de distinta efectividad y homogeneidad.



- La mezcla fabricada en central puede contener una humedad residual que es inexistente en la mezcla de laboratorio, donde los áridos son calentados y secados completamente en estufa.
- Los tiempos de permanencia a temperatura elevadas, que afectan a la absorción y al grado de envejecimiento del ligante, también difieren en uno y otro caso.
- Los ligantes modificados presentan un comportamiento pseudo-plástico no newtoniano, lo que significa que su viscosidad depende de la velocidad de deformación. Cuando se emplean este tipo de ligantes debe preverse que, a igualdad de temperatura, las viscosidades medidas en laboratorio y las que se manifiestan en la amasadora de la central, donde la mezcla se somete a cizallas notablemente más intensas, o en obra, durante su extendido y compactación, pueden ser muy distintas.

Por tanto, no debe darse por concluido el diseño de la mezcla hasta verificar que puede producirse una mezcla en central con las volumetrías y propiedades mecánicas previstas en la fórmula de trabajo.

2.2.1.6 Otras verificaciones

A causa de su origen y de los procesos de enfriamiento a que son sometidas las escorias siderúrgicas, la variabilidad de algunas propiedades del árido siderúrgico, como densidad y absorción, es superior a la que presentan los áridos naturales. En consecuencia, es conveniente obtener, además de valores medios, los rangos de variación en los resultados de los correspondientes ensayos de caracterización, información que debe solicitarse al proveedor, en su caso.

Mediante los oportunos estudios de sensibilidad debe comprobarse que la variabilidad de densidad y absorción del árido siderúrgico no afecta al comportamiento de la mezcla o, en caso contrario, adoptar medidas para reducir los rangos de variación encontrados y/o ajustar los parámetros de diseño.

2.2.2 Fabricación y puesta en obra

Las mezclas bituminosas con árido siderúrgico se producen, transportan y ponen en obra con los mismos medios que las elaboradas con áridos naturales. Sin embargo, algunas diferencias en sus propiedades termo-físicas requieren adoptar precauciones especiales y efectuar ajustes en los rangos de temperatura de fabricación y compactación de la mezcla o de apertura al tráfico de la capa terminada.



2.2.2.1 Acopio

El contenido de humedad del árido siderúrgico suele ser superior al del árido natural a causa de su morfología cavernosa y por haber sido sometido a procesos de envejecimiento o maduración mediante la aspersión de agua.

A igual grado de humedad, el árido siderúrgico precisa más tiempo y más calor que el árido natural para secarse a la intemperie. Por esta razón, es importante cuidar que desde la instalación de tratamiento hasta la central de fabricación se transporten los áridos lo más secos posible. Una vez allí es conveniente que se acopien sobre superficies pavimentadas y con pendientes adecuadas para facilitar la evacuación del agua.

Siempre que sea posible, es recomendable apartar las fracciones con humedad excesiva (> 5%), reservándolas hasta que su secado a la intemperie reduzca su contenido de agua tanto como sea posible, para no incrementar la demanda energética de la central de fabricación y para prevenir la existencia de humedad residual en la mezcla bituminosa.

NOTA: La recomendación de disponer de una superficie pavimentada y con pendientes adecuadas en la zona de acopios es válida para cualquier tipo de árido: natural o artificial, dada la gran ventaja que supone evitar el empleo de áridos contaminados o sucios.

En las inspecciones de las instalaciones de fabricación, que toda dirección facultativa debiera realizar con cierta frecuencia, una zona de acopios limpia, pavimentada y sin acumulaciones de agua en periodos de lluvia, es un indicador de que la planta adopta medidas para garantizar la calidad de su producción.

2.2.2.2 Fabricación

A igualdad de contenido de humedad, la energía necesaria para calentar el árido es mayor con áridos siderúrgicos que con áridos naturales, debido a su mayor densidad y a pesar de su menor calor específico (del orden de 0,78 J/g·K).

Por otro lado, la temperatura de fabricación y los tiempos de mezclado pueden incrementarse dado que el primer factor que afecta a las condiciones de la envuelta de una mezcla bituminosa en la amasadora de la central de fabricación es el ángulo de rozamiento interno de la mezcla de áridos.

La verificación del diseño con mezcla fabricada en central y la puesta a punto de la central de fabricación han de servir para efectuar los oportunos ajustes de las temperaturas de calentamiento en el tambor secador y de los tiempos de mezclado en la amasadora.

Además, la densidad de los áridos afecta a todos los elementos de la central de fabricación que operan volumétricamente. Antes de iniciar la fabricación de mezclas con árido siderúrgico es importante calibrar las tolvas de dosificación



en frío, cintas alimentadoras, elevadores o cualquier otro dispositivo que lo requiera.

2.2.2.3 Transporte

No es preciso prever diferencias en los procedimientos de carga en central, transporte y descarga en obra de mezclas bituminosas con árido siderúrgico.

La mezcla bituminosa con árido siderúrgico se enfría más lentamente que una mezcla bituminosa convencional, aspecto de interés en aquellas obras que requieren prolongados tiempos de transporte o de espera, y para las obras realizadas en tiempo frío.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que la mayor densidad genera un incremento en los costes de transporte.

2.2.2.4 Extendido

El extendido no presenta diferencias con el de una mezcla bituminosa fabricada únicamente con árido natural.

2.2.2.5 Compactación

Las mezclas bituminosas con árido siderúrgico se compactan con los mismos equipos que las mezclas bituminosas convencionales. Sin embargo, sus diferentes propiedades termo-físicas deben ser consideradas para ajustar convenientemente las temperaturas de inicio y final de compactación.

Como regla general, la compactación y la apertura al tráfico de las capas de mezclas bituminosas con árido siderúrgico pueda efectuarse a temperaturas más elevadas de las habituales con mezclas convencionales, contando con un mayor tiempo disponible para la actuación de los equipos de compactación, facilitando así la obtención de las densidades *in situ* especificadas.

2.3 Consideraciones y recomendaciones acerca de su empleo en mezclas bituminosas

Las propiedades que reúnen los áridos siderúrgicos los convierten en un interesante material para la fabricación de mezclas bituminosas, especialmente en capas de rodadura e intermedia, en virtud de sus características mecánicas y de su afinidad a los ligantes bituminosos.

La mayor parte de los inconvenientes asociados a su utilización (riesgos de expansión, mayor densidad, absorción, contenido de ligante...) pueden atenuarse o eliminarse por completo adoptando las precauciones necesarias durante su producción (forma de enfriamiento y tratamiento, por ejemplo), mediante un cuidadoso diseño de mezclas, o ajustando oportunamente los procedimientos de fabricación y puesta en obra.

A igualdad de otros factores, las mezclas bituminosas con árido siderúrgico correctamente diseñadas y puestas en obra presentan las siguientes ventajas:

- Proporcionan superficies con elevados coeficientes de rozamiento, gracias a la forma y la textura superficial de las partículas de árido siderúrgico.
- Poseen una buena resistencia a la fragmentación y a eventuales alteraciones granulométricas por las cargas del tráfico o los procesos de compactación.
- Son poco sensibles a la acción del agua, pues el carácter marcadamente básico del árido siderúrgico le otorga una gran afinidad química con el ligante.
- Son mezclas muy resistentes a las deformaciones plásticas, gracias al elevado rozamiento interno de su esqueleto mineral.
- Presentan módulos dinámicos y resilientes notablemente más elevados.
- Presentan mayores resistencias a tracción y a la fisuración térmica a bajas temperaturas.
- Su menor tasa de enfriamiento permite incrementar distancias y tiempos de transporte, o prolongar la acción de los equipos de compactación facilitando la obtención de las densidades especificadas.

La bibliografía especializada⁶ indica también que la forma del árido siderúrgico contribuye a reducir el ruido de rodadura, y que su forma y textura son idóneas para la construcción de mezclas bituminosas drenantes.

⁶ Por ejemplo, el artículo de Yiyang Hong, Keng Boon, Soo Loi y Tien Fang "Steel Slag Aggregate For Asphalt Pavement" presentado en el 9th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology celebrado en Dalian (China) del 9 al 13 de agosto de 2015.



Como contrapeso, algunas de las desventajas que presenta su utilización son las siguientes:

- Su elevada densidad incrementa la masa de mezcla necesaria para cubrir una misma superficie con una capa de un espesor dado (especialmente relevante en capas delgadas) y, particularmente, los costes del transporte.
- La morfología cavernosa y la superficie específica del árido siderúrgico pueden aumentar la cantidad de ligante necesario en la mezcla.
- La demanda energética en la central de fabricación puede verse incrementada a causa de la mayor capacidad térmica del árido siderúrgico.
- Las mezclas bituminosas en caliente elaboradas con árido siderúrgico, pueden contener una cierta humedad residual, a causa de la humedad inicial típica de este tipo de árido.
- Debe prevenirse el riesgo de potenciales expansiones, a causa de la eventual presencia de CaO y MgO libres, realizando el tratamiento de maduración y periodo de envejecimiento adecuado para asegurar una expansión del material por debajo de los requerimientos técnicos exigidos a la aplicación.

NOTA: La experiencia acumulada permite acreditar que el riesgo de expansión de un árido siderúrgico que ha sido tratado correctamente y ha seguido un proceso de maduración y envejecimiento adecuado, en el seno de una mezcla bituminosa, nunca superará los límites establecidos en los requerimientos para cada aplicación, evitándose cualquier tipo de expansión no deseada. Además, la película de ligante que recubre las partículas de árido y la elevada afinidad árido-ligante, constituye una barrera adicional que disminuye aún más la posibilidad de que se produzca una expansión imprevista.

Naturalmente, el alcance de cualquiera de los efectos favorables y desfavorables mencionados depende de las fracciones de árido siderúrgico utilizadas y de la proporción árido siderúrgico/árido natural.

Las aplicaciones en las que puede resultar más beneficioso el uso de árido siderúrgico en mezclas bituminosas son las siguientes:

- Capas de rodadura en vías de alta intensidad de tráfico. El árido siderúrgico es una alternativa a los áridos naturales para tráfico pesado a los que se exigen máximos valores de coeficiente de pulimento acelerado (PSV) y desgaste Los Ángeles (LA). En particular, el árido siderúrgico es especialmente ventajoso en mezclas bituminosas discontinuas (tipos BBTM, PA, SMA, AUTL) en las que el ángulo de rozamiento interno determina casi por completo, la resistencia mecánica de la mezcla bituminosa.

- Capas intermedias más rígidas. El mayor módulo resiliente de las mezclas bituminosas elaboradas con árido siderúrgico supone un incremento de su capacidad estructural que puede favorecer a incrementar la vida útil del firme.
- Mezclas bituminosas sono-reductoras. La forma cavernosa y la textura superficial del árido siderúrgico pueden contribuir a reducir el ruido de rodadura y a incrementar la eficiencia de las mezclas bituminosas diseñadas específicamente para la construcción de pavimentos sono-reductores.
- Reparaciones. Especialmente en tiempo frío, las propiedades térmicas del árido siderúrgico sirven para producir mezclas bituminosas que retienen el calor, y se mantienen trabajables, durante más tiempo. Su mayor densidad y estabilidad contribuyen a fijar mejor la mezcla bituminosa empleada en reparaciones y parcheos.

3 Conclusiones finales

Alcanzar una economía circular es una cuestión prioritaria tanto en el ámbito medioambiental, como en el económico y social. Los áridos siderúrgicos son materiales que pueden ser una alternativa a la explotación de las canteras y/o utilización de áridos naturales, mejorando la eficacia de la utilización de recursos disponibles, reduciendo vertederos y obteniendo mejoras medioambientales. El aprovechamiento de estos materiales, con las precauciones y recomendaciones expuestas, contribuye a la economía circular, reduciendo nuestra dependencia de los recursos naturales e impulsando el desarrollo sostenible.

Su utilización está amparada, desde hace tiempo, por el marco normativo. Como se ha puesto de manifiesto, el vigente PG-3 incluye las especificaciones necesarias para su empleo en diferentes unidades de obra. En este sentido, esta Nota Técnica pretende contribuir a divulgar su conocimiento y aportar algunas precisiones y consideraciones a tener en cuenta por los distintos actores participantes en las actuaciones en carretera: proyectistas, dirección del proyecto, fabricantes, contratistas, consultorías de ingeniería y dirección de la obra. Cabe destacar que los países de nuestro entorno, tales como Reino Unido, Alemania y Francia, poseen normativa y especificaciones técnicas para su empleo, así como experiencia en su utilización. Lo mismo sucede, a nivel autonómico, en el País Vasco, Cataluña y Cantabria.

Las escorias negras, adecuadamente tratadas, cumplen generalmente las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras. Presentan un riesgo latente de expansión y de hinchamiento, por lo que resulta muy importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando se sobrepasen los valores establecidos. Debido a su porosidad, su



angulosidad, y a la falta de finos, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos.

No deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento o junto a obras de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

Desde el punto de vista medioambiental, es preciso comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación sobre las escorias permanezcan por debajo de los límites fijados. Los lixiviados de las escorias, en especial de aquellas que no hayan sido envejecidas, pueden presentar problemas debido fundamentalmente a los altos valores de pH y a la presencia de cantidades significativas de metales pesados.

La experiencia de su empleo ha puesto de manifiesto que un adecuado tratamiento, y una clasificación y selección de las escorias en la planta, pueden proporcionar áridos de calidad para ser utilizados en mezclas bituminosas. Estos áridos suelen poseer un buen coeficiente de Los Ángeles y un excelente coeficiente de pulimento acelerado, que los puede hacer especialmente utilizables en capas de rodadura. La composición química y el carácter básico de las escorias garantizan una buena adhesividad con los betunes convencionales. En la fabricación de mezclas con estos áridos se plantea el problema de la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso siderúrgico y árido fino calizo.

La utilización de áridos siderúrgicos en la producción de mezclas bituminosas, presentan ventajas y también algunas dificultades específicas, como ya se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior. Se trata, pues, en definitiva, de realizar un correcto diseño y puesta en obra, para aprovechar las primeras y evitar las segundas. También se deberán comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación cumplen las especificaciones fijadas, aunque el árido siderúrgico envuelto en una matriz bituminosa emite solamente una fracción pequeña de elemento lixiviado, por lo que habitualmente cumplirá las normativas ambientales al respecto.



ANEXO

Cómo recoger el empleo de árido siderúrgico en el PPTP de los distintos tipos de mezclas bituminosas

Preámbulo

En este anexo se recoge una propuesta sobre la forma en la que incorporar a los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de los proyectos el uso de árido siderúrgico.

Para facilitar su consulta se subrayan los textos adicionales al contenido del vigente PG-3 y de la Orden Circular 3/2019.

1 Microaglomerados en frío

540.2.3 Áridos

540.2.3.1 Características generales

Los áridos a emplear podrán ser naturales o artificiales (como, por ejemplo, el árido siderúrgico) siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

El árido siderúrgico, de cualquier procedencia, deberá cumplir los siguientes requisitos adicionales:

- Presentar una expansividad inferior al tres con cinco por ciento (< 3,5%) en volumen (UNE-EN 10343).
- La variación de su densidad aparente (norma UNE-EN 1097-6), con respecto a su valor declarado o utilizado en el diseño de mezclas, obtenida en cualquiera de los ensayos de control de calidad de los materiales será inferior al 10% y la de la mezcla de áridos será inferior al 7,5%.

.../...



540.2.3.2.3 Angulosidad (Porcentaje de caras de fractura)

.../...

En el caso de árido siderúrgico, se considerará que la proporción de partículas totalmente trituradas es del cien por cien (100%) independientemente de que hayan sido obtenidas por clasificación y trituración o únicamente por clasificación de la escoria siderúrgica.

540.3 Tipo, composición y dotación del microaglomerado

.../...

La granulometría (norma UNE-EN 933-1), del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos (incluido el polvo mineral), según el tipo de microaglomerado, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la tabla 540.7.

Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de quince décimas de gramo por centímetro cúbico ($> 0,15 \text{ g/cm}^3$) las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 540.7 como porcentajes en masa (% en masa), deben tomarse como porcentajes en volumen (% en volumen).

..../....

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo, la composición, la dotación media y mínima (excluida el agua total) del microaglomerado y el número de capas de su aplicación, que deberán cumplir lo especificado en la tabla 540.8. En el caso de la utilización de árido siderúrgico las dotaciones indicadas deberán adecuarse a la densidad del conjunto de áridos combinados, que será significativamente superior al caso contemplado en la Tabla 540.8 para áridos naturales.

.../...

NOTA: A falta de datos más precisos, se puede tomar como referencia que la utilización de árido siderúrgico en microaglomerados en frío como árido grueso, supone un incremento de las dotaciones medias del orden de un 12% para el MICROF 11, del 10% para el MICROF 8, y del 5-6% para el MICROF 5.

540.9 Control de calidad

540.9.1.2 Áridos

Los áridos deberán disponer del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+, salvo en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011).



En el primer caso, el control de procedencia se podrá llevar a cabo mediante la verificación de que los valores declarados en los documentos que acompañan al marcado CE permiten deducir el cumplimiento de las especificaciones establecidas en este Pliego.

Cuando se utilicen áridos siderúrgicos, se solicitará al proveedor que facilite información sobre la densidad relativa (norma UNE-EN 1097-6) y la absorción (norma UNE-EN 1097-6) de cada fracción suministrada, así como de los resultados de estabilidad de volumen contemplados en el apartado 4.3.4 de la norma UNE-EN 13043.

.../...

2 Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso (AC)

542.2.3 Áridos

542.2.3.1 Características generales

Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas podrán ser de origen natural, artificial (como, por ejemplo, el árido siderúrgico) o reciclado siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.

.../...

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

El árido siderúrgico, de cualquier procedencia, deberá cumplir los siguientes requisitos adicionales:

- Presentar una expansividad inferior al tres con cinco por ciento (< 3,5%) en volumen (UNE-EN 10343).
- La variación de su densidad aparente (norma UNE-EN 1097-6), con respecto a su valor declarado o utilizado en el diseño de mezclas, obtenida en cualquiera de los ensayos de control de calidad de los materiales será inferior al 10% y la de la mezcla de áridos será inferior al 7,5%.

.../...



542.2.3.2.3 Angulosidad (Porcentaje de caras de fractura)

.../...

En el caso de árido siderúrgico, se considerará que la proporción de partículas totalmente trituradas es del cien por cien (100%) independientemente de que hayan sido obtenidas por clasificación y trituración o únicamente por clasificación de la escoria siderúrgica.

542.3 Tipo y composición de la mezcla

.../...

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos (incluido el polvo mineral), según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la tabla 542.8. El análisis granulométrico se realizará de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1.

Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de quince décimas de gramo por centímetro cúbico ($> 0,15 \text{ g/cm}^3$) las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 542.8 como porcentajes en masa (% en masa), deben tomarse como porcentaje en volumen (% en volumen).

.../...

En el caso de que la densidad del polvo mineral total, suma del procedente de los áridos y el de aportación (norma UNE-EN 1097-7), sea diferente de dos gramos y sesenta y cinco centésimas de gramo por centímetro cúbico ($2,65 \text{ g/cm}^3$), las relaciones ponderales recomendables de la tabla 542.10, así como las indicadas para mezclas de alto módulo, se deberán corregir multiplicando por el factor $\beta = \rho_d / 2,65$, donde ρ_d es la densidad del polvo mineral total.

542.5 Ejecución de las obras

542.5.1 Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo

542.5.1.1 Principios generales

.../...

En el caso de categorías de tráfico pesado T00 a T2, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir un estudio de sensibilidad de las propiedades de la mezcla a variaciones de densidad de los áridos, granulometría y dosificación de ligante hidrocarbonado que no excedan de las admitidas en los epígrafes 542.2.3.1 y 542.9.3.1.

.../...



542.9 Control de calidad

542.9.1.2 Áridos

Los áridos deberán disponer del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+, salvo en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011).

En el primer caso, el control de procedencia se podrá llevar a cabo mediante la verificación de que los valores declarados en los documentos que acompañan al marcado CE permiten deducir el cumplimiento de las especificaciones establecidas en este Pliego.

Cuando se utilicen áridos siderúrgicos, se solicitará al proveedor que facilite información sobre la densidad relativa (norma UNE-EN 1097-6) y la absorción (norma UNE-EN 1097-6) de cada fracción suministrada, así como de los resultados de estabilidad de volumen contemplados en el apartado 4.3.4 de la norma UNE-EN 13043.

.../...

542.9.3 Control de ejecución

542.9.3.1 Fabricación

.../...

Para todas las mezclas bituminosas, se tomarán muestras a la descarga del mezclador, y con ellas se efectuarán los siguientes ensayos:

A la salida del mezclador o silo de almacenamiento, sobre cada elemento de transporte:

- Control del aspecto de la mezcla y medición de su temperatura. Se rechazarán todas las mezclas segregadas, carbonizadas o sobrecalentadas y aquellas cuya envuelta no sea homogénea. La humedad de la mezcla no deberá ser superior en general al cinco por mil (5‰) en masa del total. En mezclas semicalientes, este límite se podrá ampliar hasta el uno y medio por ciento (1,5%).
- Se tomarán muestras de la mezcla fabricada, con la frecuencia de ensayo indicada en la tabla 542.16, en función del nivel de conformidad (NCF) definido en el Anexo A de la norma UNE-EN 13108-21, determinado por el método del valor medio de cuatro (4) resultados, y según el nivel de control asociado a la categoría de tráfico pesado y al tipo de capa. Sobre estas muestras se determinará:
 - la dosificación de ligante (norma UNE-EN 12697-1),



- la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE EN 12697 2), y
- el contenido de agua (norma UNE-EN 12697-28) en el caso en que la humedad de los áridos, su naturaleza o la temperatura de fabricación puedan dar lugar a la presencia de humedad residual, como ocurre por ejemplo con el árido siderúrgico.

.../...

542.9.3.2 Puesta en obra

542.9.3.2.1 Extensión

.../...

Sobre algunas de estas muestras, se podrán llevar a cabo, además, a juicio del Director de las Obras, ensayos de comprobación de la dosificación de ligante (norma UNE-EN 12697-1), de la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE-EN 12697-2) y de contenido de agua (norma UNE EN 12697-28).

3 Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes (PA) y discontinuas (BBTM)

543.2.3 Áridos

543.2.3.1 Características generales

.../...

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

El árido siderúrgico, de cualquier procedencia, deberá cumplir los siguientes requisitos adicionales:

- Presentar una expansividad inferior al tres con cinco por ciento (< 3,5%) en volumen (UNE-EN 10343).
- La variación de su densidad aparente (norma UNE-EN 1097-6), con respecto a su valor declarado o utilizado en el diseño de mezclas, obtenida en cualquiera de los ensayos de control de calidad de los materiales será inferior al 10% y la de la mezcla de áridos será inferior al 7,5%.

.../...



543.2.3.2.3 Angulosidad (Porcentaje de caras de fractura)

.../...

En el caso de árido siderúrgico, se considerará que la proporción de partículas totalmente trituradas es del cien por cien (100%) independientemente de que hayan sido obtenidas por clasificación y trituración o únicamente por clasificación de la escoria siderúrgica.

543.3 Tipo y composición de la mezcla

.../...

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos (incluido el polvo mineral), según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la tabla 543.8. El análisis granulométrico se realizará de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1.

Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de quince décimas de gramo por centímetro cúbico ($> 0,15 \text{ g/cm}^3$) las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 543.8 como porcentaje en masa (% en masa), deben tomarse como porcentaje en volumen (% en volumen).

.../...

En el caso de la utilización de árido siderúrgico las dotaciones medias de mezcla indicadas en la Tabla 543.9 deberán adecuarse a la densidad del conjunto de áridos combinados, que será significativamente superior al caso contemplado en ella para áridos naturales.

NOTA: A falta de datos más precisos, se puede tomar como referencia que la utilización de árido siderúrgico como árido grueso, supone un incremento de las dotaciones medias del orden de un 20% para mezclas porosas (PA) y del 25% para mezclas discontinuas (BBTM).

Salvo justificación en contrario, la relación ponderal recomendable entre los contenidos de polvo mineral y ligante hidrocarbonado (expresados ambos respecto de la masa total de árido seco, incluido el polvo mineral) determinada en la fórmula de trabajo, según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida en los siguientes intervalos:

- Entre doce y dieciséis décimas (1,2 a 1,6) para las mezclas tipo BBTM A.
- Entre diez y doce décimas (1,0 a 1,2) para las mezclas tipo BBTM B.
- Entre nueve y once décimas (0,9 a 1,1) para las mezclas tipo

En el caso de que la densidad del polvo mineral total, suma del procedente de los áridos y el de aportación (norma UNE-EN 1097-7), sea diferente de dos



gramos y sesenta y cinco centésimas de gramo por centímetro cúbico (2,65 g/cm³), las relaciones ponderales indicadas se deberán corregir multiplicando por el factor $\beta = \rho_d/2,65$, donde ρ_d es la densidad del polvo mineral total.

543.5 Ejecución de las obras

543.5.1 Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo

543.5.1.1 Principios generales

.../...

En el caso de categorías de tráfico pesado T00 a T2, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir un estudio de sensibilidad de las propiedades de la mezcla a variaciones de densidad de los áridos, granulometría y dosificación de ligante hidrocarbonado que no excedan de las admitidas en los epígrafes 543.2.3 y 543.9.2.2.

.../...

543.9 Control de calidad

543.9.1.2 Áridos

Los áridos deberán disponer del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+, salvo en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011).

En el primer caso, el control de procedencia se podrá llevar a cabo mediante la verificación de que los valores declarados en los documentos que acompañan al marcado CE permiten deducir el cumplimiento de las especificaciones establecidas en este Pliego.

Cuando se utilicen áridos siderúrgicos, se solicitará al proveedor que facilite información sobre la densidad relativa (norma UNE-EN 1097-6) y la absorción (norma UNE-EN 1097-6) de cada fracción suministrada, así como de los resultados de estabilidad de volumen contemplados en el apartado 4.3.4 de la norma UNE-EN 13043.

.../...



543.9.3 Control de ejecución

543.9.3.1 Fabricación

.../...

Para todas las mezclas bituminosas, se tomarán muestras a la descarga del mezclador, y con ellas se efectuarán los siguientes ensayos:

A la salida del mezclador o silo de almacenamiento, sobre cada elemento de transporte:

- Control del aspecto de la mezcla y medición de su temperatura. Se rechazarán todas las mezclas segregadas, carbonizadas o sobrecalentadas y aquéllas cuya envuelta no sea homogénea. La humedad de la mezcla no deberá ser superior en general al cinco por mil (5‰) en masa del total. En mezclas semicalientes, este límite se podrá ampliar hasta el uno y medio por ciento (1,5%).
- Se tomarán muestras de la mezcla fabricada, con la frecuencia de ensayo indicada en la tabla 543.14, en función del nivel de conformidad (NCF) definido en el Anexo A de la norma UNE-EN 13108-21, determinado por el método del valor medio de cuatro (4) resultados, y según el nivel de control asociado a la categoría de tráfico pesado y al tipo de capa. Sobre estas muestras se determinará:
 - la dosificación de ligante (norma UNE-EN 12697-1),
 - la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE EN 12697 2), y
 - el contenido de agua (norma UNE-EN 12697-28) en el caso en que la humedad de los áridos, su naturaleza o la temperatura de fabricación puedan dar lugar a la presencia de humedad residual, como ocurre por ejemplo con el árido siderúrgico.

.../...

543.9.3.2 Puesta en obra

543.9.3.2.1 Extensión

.../...

Sobre algunas de estas muestras, se podrán llevar a cabo, además, a juicio del Director de las Obras, ensayos de comprobación de la dosificación de ligante (norma UNE-EN 12697-1), de la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE-EN 12697-2) y de contenido de agua (norma UNE EN 12697-28).



4 MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO SMA

544.2.3 Áridos

544.2.3.1 Características generales

.../...

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

El árido siderúrgico, de cualquier procedencia, deberá cumplir los siguientes requisitos adicionales:

- Presentar una expansividad inferior al tres con cinco por ciento (< 3,5%) en volumen (UNE-EN 10343).
- La variación de su densidad aparente (norma UNE-EN 1097-6), con respecto a su valor declarado o utilizado en el diseño de mezclas, obtenida en cualquiera de los ensayos de control de calidad de los materiales será inferior al 10% y la de la mezcla de áridos será inferior al 7,5%.
- diez décimas de gramo por centímetro cúbico (< 0,10 g/cm³).

.../...

544.2.3.2.3 Angulosidad (Porcentaje de caras de fractura)

.../...

En el caso de árido siderúrgico, se considerará que la proporción de partículas totalmente trituradas es del cien por cien (100%) independientemente de que hayan sido obtenidas por clasificación y trituración o únicamente por clasificación de la escoria siderúrgica.

544.3 Tipo y composición de la mezcla

.../...

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos (incluido el polvo mineral), según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la tabla 544.8. El análisis granulométrico se realizará de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1.

Cuando se combinen fracciones de árido cuyas densidades aparentes difieran entre sí más de quince décimas de gramo por centímetro cúbico (> 0,15 g/cm³) las proporciones cernidas por cada tamiz indicadas en la Tabla 544.8 como porcentajes en masa (% en masa), deben tomarse como porcentaje en volumen (% en volumen).



.../...

Salvo justificación en contrario, la relación ponderal recomendable entre los contenidos de polvo mineral y ligante hidrocarbonado (expresados ambos respecto de la masa total de árido seco, incluido el polvo mineral) determinada en la fórmula de trabajo, según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida entre doce y dieciséis décimas (1,2 a 1,6).

En el caso de que la densidad del polvo mineral total, suma del procedente de los áridos y el de aportación (norma UNE-EN 1097-7), sea diferente de dos gramos y sesenta y cinco centésimas de gramo por centímetro cúbico (2,65 g/cm³), las relaciones ponderales indicadas se deberán corregir multiplicando por el factor $\beta = \rho_d / 2,65$, donde ρ_d es la densidad del polvo mineral total.

544.5 Ejecución de las obras

544.5.1 Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo

544.5.1.1 Principios generales

.../...

En el caso de categorías de tráfico pesado T00 a T2, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir un estudio de sensibilidad de las propiedades de la mezcla a variaciones de densidad de los áridos, granulometría y dosificación de ligante hidrocarbonado que no excedan de las admitidas en los epígrafes 544.2.3 y 544.9.2.2.

.../...

544.9 Control de calidad

544.9.1.2 Áridos

Los áridos deberán disponer del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+, salvo en el caso de los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la correspondiente obra (artículo 5.b del Reglamento 305/2011).

En el primer caso, el control de procedencia se podrá llevar a cabo mediante la verificación documental consistente en que los valores declarados en la información que acompaña al marcado CE son conformes con las especificaciones establecidas en este artículo y en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. Si se detectara alguna anomalía durante su transporte, almacenamiento o manipulación, el Director de la Obra, en el uso de sus atribuciones, podrá disponer en cualquier momento, la realización de comprobaciones y ensayos, con objeto de asegurar sus propiedades y la calidad establecida en este artículo.



Cuando se utilicen áridos siderúrgicos, se solicitará al proveedor que facilite información sobre la densidad relativa (norma UNE-EN 1097-6) y la absorción (norma UNE-EN 1097-6) de cada fracción suministrada.

.../...

544.9.3 Control de ejecución

544.9.3.1 Fabricación

.../...

Controles a la salida del mezclador o silo de almacenamiento, sobre cada elemento de transporte:

Estos controles se realizarán sobre todas las mezclas bituminosas, con o sin marcado CE, tomando muestras a la descarga del mezclador y realizando los ensayos correspondientes.

- Control del aspecto de la mezcla y medición de su temperatura. Se rechazarán todas las mezclas segregadas, carbonizadas o sobrecalentadas y aquellas cuya envuelta no sea homogénea. La humedad de la mezcla no deberá ser superior en general al cinco por mil (5‰) en masa del total. En mezclas semicalientes, este límite se podrá ampliar hasta el uno y medio por ciento (1,5%).
- Se tomarán muestras de la mezcla fabricada, con la frecuencia de ensayo indicada en la tabla 544.14, en función del nivel de conformidad (NCF) definido en el Anexo A de la norma UNE-EN 13108-21, determinado por el método del valor medio de cuatro (4) resultados, y según el nivel de control asociado a la categoría de tráfico pesado y al tipo de capa. Sobre estas muestras se determinará:
 - la dosificación de ligante (norma UNE-EN 12697-1),
 - la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE EN 12697 2), y
 - el contenido de agua (norma UNE-EN 12697-28) en el caso en que la humedad de los áridos, su naturaleza o la temperatura de fabricación puedan dar lugar a la presencia de humedad residual, como ocurre por ejemplo con el árido siderúrgico.

.../...



544.9.3.2 Puesta en obra

544.9.3.2.1 Extensión

.../...

Al menos en un veinte por ciento (20 %) de los lotes se tomarán muestras sobre las que se realizarán ensayos de comprobación de la dosificación de ligante (norma UNE-EN12697-1), de la granulometría de los áridos extraídos (norma UNE-EN 12697-2) y de contenido de agua (norma UNE EN 12697-28). A la vista de los resultados, el Director de la Obra podrá aumentar o disminuir la frecuencia de muestreo.

.../...