

ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO

Nombre en inglés: Electric Arc Furnace Slags (EAF-Slags)



ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

1.- ORIGEN ⁽¹⁾

El proceso de fabricación del acero, tanto común como especial, en las acerías de horno de arco eléctrico se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o fusión, donde se produce la fusión de las materias primas que se realiza en hornos de arco eléctrico, y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del baño fundido, que se inicia en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara.

La principal materia prima empleada para la fabricación de acero en horno de arco eléctrico es la chatarra de hierro dulce o acero. Como elementos auxiliares se pueden cargar también pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro y de ferroaleaciones.

La etapa de fusión incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso y silicio, la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las **escorias negras**.

La etapa de afino incluye la desoxidación, que permite eliminar los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descarburación del acero. El líquido fundido procedente del horno eléctrico se alimenta al horno-cuchara, se cubre con una escoria que se denomina **escoria blanca** y se agita continuamente con el soplado de gas inerte, normalmente argón. La escoria blanca permite la reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño, durante la denominada fase de desoxidación. Paralelamente se realiza la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN (*)

En España funcionan actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco (14 de ellas en el País Vasco), que produjeron en el año 2007 un total de 14,8 Mt de acero de las cuales:

- Acero común o especial 13.704.300 t
- Acero inoxidable 1.104.657 t

con el siguiente reparto por comunidades (en el 2007):

País Vasco	48,0%
Cataluña	15,4%
Andalucía	11,3%
Cantabria	7,6%
Madrid	6,7%
Galicia	5,0%
Extremadura	4,0%
Aragón	1,5%

Considerando la generación de escorias que se producen por tonelada de acero se obtienen las siguientes cantidades anuales de escorias de acerías de acero común o especial:

Producción de acero (10 ³ t)	Generación de escoria kg/t de acero		Producción de escorias (t)
13.704	Escoria negra	110-150	1.781.560
	Escoria blanca	20-30	342.608

Tabla 1: Producción anual de escorias de acería

(*) Información facilitada por UNESID

ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO



Figura 1: Mapa de localización de las acerías de horno de arco eléctrico en España

3.- VALORIZACIÓN

3.1.-PROPIEDADES ^(1, 2, 3)

3.1.1.-Escorias negras

Mediante el proceso de fusión en el horno de arco eléctrico se obtiene acero líquido y, nadando sobre su superficie, escoria negra, que se extrae por una de las puertas del horno.

La composición química de la escoria está condicionada por el tipo de chatarra utilizada, el control de las variables de operación, etc. Pueden considerarse como representativos los porcentajes recogidos en la Tabla 2 ^(1, 2, 3)

	Porcentaje (%)
Ca O	22-60
Si O ₂	11-37
Fe O	0,5-4
Fe ₂ O ₃	38
Mg O	4 - 12
Cr ₂ O ₃	1-8

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

Ti O ₂	0,6-2
MnO	1-4
Al ₂ O ₃	2-8
P2O6	0-0,02

Tabla 2: Composición química de la escoria de acería

Por otra parte, para el caso concreto de las escorias estudiadas en España se han obtenido los siguientes resultados de composición química y de caracterización física ⁽⁴⁾ (Tablas 3 y 4 respectivamente):

Composición química	Rango (%)	Valor medio (%)
FeO	7,0-35,0	25
Fe ₂ O ₃	11,0-40,0	25
CaO	23,0-32,0	25
CaO libre	0-4,0	2
SiO ₂	8,0-15,0	11
Al ₂ O ₃	3,5-7,0	5
MgO	4,8-6,6	5
MnO	2,5-4,5	4

Tabla 3: Composición química de la escoria de acería españolas

Propiedad	Árido grueso	Árido fino
Tamaño (mm)	4,76-25,0	0-4,76
Densidad aparente (Mg/m ³)	3,35	3,70
Absorción (%)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	–
Desgaste de Los Ángeles (%)	≈20	–

Tabla 4: Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras

Tras la extracción de la escoria del horno, su enfriamiento puede hacerse de diferentes formas:

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. La escoria presentada un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.
- Se puede verter en un cono de fundición que se coloca debajo de la piqueta del horno eléctrico. La escoria comienza a enfriarse en el cono y se vierte en una fosa donde se enfría. La escoria obtenida presenta un aspecto menos poroso que la anterior y es más cristalina.
- Se vierte en un cono de fundición que se deja enfriar. En este caso el enfriamiento es el más lento, y una vez fría se saca del cono. La escoria obtenida es muy compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

3.1.2.- Escorias blancas

Las escorias blancas, procedentes de la fase de afino, se caracterizan por su contenido en metales pesados como cromo, zinc o plomo (inferior al 1%) y el reducido tamaño de sus partículas.

Ensayos químicos realizados en nuestro país establecen la siguiente composición para las escorias blancas de acería (Tabla 5):

Si O ₂ (%)	17,4 - 19,3	Fluoruro (%)	1,4
Fe ₂ O ₃ (%)	1,1 - 3,6	Sulfuro (mg/kg)	503
Fe O (%)	0,0 - 0,95	Zinc (ppm)	596
Al ₂ O ₃ (%)	3,2 - 10,4	Plomo (ppm)	84
Ca O (%)	45,3 - 62,1	Cobre (ppm)	200
Mg O (%)	4,5 - 17,2	Cromo (ppm)	150
Mn O (%)	0,0 - 1,2	Níquel (ppm)	80
S (%)	1,45 - 1,65		
C (%)	0,0 - 0,03		

Tabla 5: Composición química de los áridos procedentes de escorias blancas

La caracterización ⁽⁵⁾ de escorias blancas de horno cuchara procedentes de la factoría de la empresa Tubos Reunidos (Álava, España), tras un período de tratamiento de dos años hasta su correcta estabilización, arrojó los siguientes resultados (Tabla 6):

Propiedades físicas		
Densidad	g/cm ³	2,65
Superficie específica	cm ² /g	2064

Tabla 6: Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias blancas

3.2.- PROCESAMIENTO ⁽¹⁾

Debido a que tanto sus propiedades como sus posibilidades de valorización son claramente diferentes, **es fundamental la separación entre escorias negras y blancas.**

Hasta la fecha se han encontrado cuatro alternativas de valorización de las escorias negras que han sido sancionadas por la experiencia:

- Introducción en cementera como aporte de hierro en el proceso de fabricación del clinker.
- Utilización en la capa de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa.
- Como material para explanadas, subbases y bases de carreteras.
- Como árido para hormigón.

Para la primera alternativa es necesario un pretatamiento de cribado de la escoria, de forma que su tamaño no sea mayor de 50 mm, para evitar distorsiones en las cintas transportadoras.

Para el resto de alternativas es necesario que las escorias sean tratadas adecuadamente (machacado, separación de metales, cribado y clasificación, y en su caso envejecimiento).

Para el caso particular de la **utilización de la escoria como árido para hormigón**, existen estudios españoles⁽⁶⁾ de los compuestos potencialmente expansivos del árido siderúrgico (CΓ,

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

SO₃, CaO libre y MgO libre) que evidencian que un proceso de envejecimiento, consistente en extender el material en una superficie amplia y someterlo a ciclos de humectación-secado, produce una reducción en la capacidad de expansión de los compuestos presentes en las escorias (sulfatos y magnesia libre) así como la total desaparición de la cal libre. Cabe destacar que el tratamiento de envejecimiento es principalmente efectivo durante los primeros 45 días, estabilizándose a partir de ese momento. Las escorias analizadas tras el tratamiento presentaban concentraciones de dichos compuestos expansivos muy inferiores a los máximos especificados en la Instrucción EHE.

La única alternativa de valorización de las escorias blancas, confirmada por experiencias realizadas a escala industrial, es su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga. Para esta alternativa no será necesario un pretratamiento previo, siempre y cuando se tenga la precaución de no incluir elementos extraños, como trozos metálicos, y los tamaños de las partículas del material sean inferiores a 50 mm.

En el procesamiento de las escorias, aparte de las medidas preventivas para evitar la contaminación atmosférica por el polvo mineral, es recomendable situar los acopios sobre una superficie pavimentada, recoger las aguas pluviales e instalar un sistema de depuración de aguas

3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

3.3.1.- Escorias negras

Los áridos procedentes de las escorias negras de acerías de hornos de arco eléctrico tienen una elevada densidad relativa, entre 3,1 y 4,5, muy por encima de la de los áridos naturales ⁽²⁾ ⁽⁷⁾. Esta diferencia hay que tenerla en cuenta en las dosificaciones y al considerar los costes de transporte.

La absorción de agua de la escoria presenta en general valores entre 1% y 4% ^(1, 2, 8) en volumen y en algunos casos próximos al 7 %. Esta absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos de hielo-deshielo o humedad-sequedad.

Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles entre 17 % y 25%, e inferiores ⁽¹⁾⁽⁸⁾.

El coeficiente de pulimento acelerado varía en general entre -50 y 60, cumpliendo los valores exigidos para áridos de mezclas bituminosas en capas de rodadura.

Si se combinan áridos siderúrgicos con otro tipo de áridos, las especificaciones exigidas deberán cumplirse para cada uno de los áridos combinados. Además, la mezcla deberá realizarse en planta.

Para el caso de su utilización en hormigón, experimentalmente ⁽⁴⁾ se ha observado que tras un proceso de machaqueo el árido grueso procedente de la escoria negra puede ajustarse de forma satisfactoria a las granulometrías requeridas en la norma ASTM C33 (tamaño máximo de 25 mm). Sin embargo, este ajuste no es tan fácil de conseguir para el caso del árido fino, siendo preciso llevar a cabo un proceso especial de triturado que resulta caro y poco efectivo, existiendo siempre un déficit notable de aquellos tamaños de partícula que pasan por los tamices menores. Es éste un problema importante que deberá tenerse en cuenta en la producción de morteros y hormigones, pudiéndose solventar en las dosificaciones utilizando un árido fino adecuado por mezcla de escorias con filler, en una proporción que deberá ser estudiada para cada caso concreto. Se incluye la siguiente combinación utilizada experimentalmente, a modo de ejemplo (Tabla 7) ⁽⁴⁾:

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

Tamiz (mm)	Escoria (% pasa)	Filler calizo (% pasa)
9,52	100	100
4,76	99,6	100
2,38	57,9	100
2,00	46,2	100
1,19	22,7	84
0,59	5,9	62
0,42	4,8	51
0,30	2,8	43
0,15	1,3	32
0,075	0,6	21

Tabla 7: Granulometría del árido fino procedente de escoria y del filler calizo

Tal como figura en el apartado 3.1.1., el contenido de Ca O en escorias analizadas en nuestro país oscila en general entre el 23% y 32%. En la bibliografía internacional se han referido contenidos típicos de Ca O sensiblemente mayores ⁽⁹⁾.

Debido a la presencia de óxidos de cal y magnesio libre en su composición, las escorias negras de acería tienen **naturaleza expansiva**. La cal libre se hidrata rápidamente y puede originar grandes cambios de volumen en pocas semanas, mientras que la hidratación del magnesio se produce mucho más lentamente.

Por ello, antes de su utilización, es aconsejable realizar un ensayo de hinchamiento, con el fin de comprobar que las escorias no van a sufrir ningún problema técnico debido a la presencia de cal libre y/o magnesio libre. El ensayo propuesto para determinar la estabilidad volumétrica es el descrito en la norma UNE-EN 1744-1.

Los lixiviados de estas escorias pueden tener un pH superior a 11, y por tanto, presentar problemas de corrosión en las tuberías de aluminio y acero que se coloquen en contacto directo con ellas ⁽¹⁰⁾.

Se han registrado casos de obturación de los sistemas de drenaje con los carbonatos precipitados por la reacción del hidróxido de calcio de los lixiviados con el dióxido de carbono de la atmósfera ⁽¹¹⁾.

3.3.2.- Escorias blancas

Las escorias blancas presentan en su composición silicatos tricálcico y bicálcico, aluminoferrito tetracálcico, aluminato tricálcico y ferrito dicálcico.

3.4.- APLICACIONES

3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes

Las escorias blancas de acería en general podrían ser utilizadas en la estabilización de suelos y como material para construcción de terraplenes. Este tipo de aprovechamiento se encuentra en fase de investigación y desarrollo.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

3.4.2.- Firmes de carreteras

Las **escorias negras**, adecuadamente tratadas, cumplen con creces, generalmente, las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares **en coronación de explanadas, subbases y bases** de carreteras. Tienen latente el riesgo de expansión y de hinchamiento, por lo que es muy importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepase 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 obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

Se ha comprobado que un adecuado tratamiento, y una clasificación y selección de las escorias en la planta, pueden proporcionar sin problemas **áridos** de calidad para ser utilizados **en mezclas bituminosas** ^(12, 13, 14, 15). Estos áridos poseen un buen coeficiente de Los Ángeles y un excelente coeficiente de pulimento acelerado, que los hace **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 escoria y árido fino calizo.

La utilización de áridos siderúrgicos en la producción de mezclas bituminosas presenta algunas dificultades específicas ⁽¹⁶⁾:

- Su elevada densidad supone no sólo un mayor peso de la unidad construida, sino también una dosificación volumétrica diferente de las relaciones ponderales habituales.
- Su mayor absorción conlleva demandas de betún superiores a las que se deducirían de las proporciones volumétricas correspondientes.
- La variabilidad de las dos magnitudes anteriores, densidad y absorción, obliga a cuidar todos los procesos involucrados en el tratamiento de la escoria para mantener bajo control la composición volumétrica de la mezcla bituminosa.
- Su diferente textura superficial, aunque afecta positivamente al rozamiento neumático-pavimento en las capas de rodadura, puede producir nuevas diferencias sobre las relaciones volumétricas esperadas entre ligante y áridos.

En EEUU se han llevado a cabo estudios para analizar la posibilidad de utilización de áridos siderúrgicos como sustitutivos tanto de áridos finos como gruesos en **hormigones para firmes**. Las investigaciones preliminares llevadas a cabo en el Estado de Ohio han sido satisfactorias ⁽¹⁷⁾.

3.4.3.- Edificación y obra pública

En el campo de la edificación y obra pública, las **escorias negras** podrían utilizarse en la industria del cemento (como aporte de hierro al clínker o como adición) y como árido para hormigón.

Utilización en cementera de escorias negras

En España, se ha realizado como experiencia piloto, el reciclaje de las escorias negras introduciéndolas en cementeras como aporte de hierro, silicio y cal al horno rotativo en el proceso de fabricación del clínker. La conclusión del estudio es que esta aplicación parece no

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

presentar ninguna limitación desde el punto de vista técnico ni medioambiental ⁽¹⁾. El control de la calidad medioambiental de las escorias en esta aplicación, se realiza mediante la determinación de metales presentes en el clínker elaborado y en las partículas en suspensión emitidas por la chimenea.

En la composición química del clinker con escorias, los únicos elementos que sufren cambios son el cromo y el manganeso (que aumentan considerablemente su porcentaje). No obstante, y dado que la legislación española no recoge limitaciones para dichos elementos y que su presencia en el cemento no representa problemas para la calidad técnica de dicho material, no se precisa tenerlos en cuenta.

La dosificación adecuada del material, en base a la composición química, con objeto de obtener un producto final de características iguales al obtenido con la utilización de materia prima convencional, se estima aproximadamente en un 4%, sin aparecer problemas de calidad técnica del producto final ⁽¹⁾.

Otros estudios ⁽¹⁸⁾ han obtenido que cementos con un contenido de escorias entre el 15-30% pueden cumplir los requisitos establecidos para los cementos de categoría resistente 42.5, mientras que con un contenido de escorias del 45% pueden satisfacer los requisitos establecidos para los cementos de categoría resistente 32.5. Estos cementos presentan una menor demanda de agua, por lo que mejora su trabajabilidad, aunque presentan un mayor tiempo de fraguado.

Así mismo podría pensarse en la utilización de estas escorias como adición en mezclas con cementos para fabricación de hormigones y otros derivados, para lo cual como punto de partida pueden tomarse como referencia las especificaciones pedidas a otras adiciones.

Utilización de escorias negras como árido para morteros

Algunos estudios han investigado la posibilidad de utilizar las escorias de acería en la fabricación de morteros ⁽¹⁹⁾.

Para ello, el material necesita una molienda previa para obtener una granulometría similar a la de un árido convencional. Con este tratamiento, se puede conseguir un material con un huso granulométrico dentro del especificado en los límites que recoge la Norma Básica de la Edificación NBE FL-90 y que presenta un contenido de finos muy reducido, inferior al 3%.

Según este estudio, los morteros estudiados (con distintos porcentajes de escorias), presentan una buena resistencia a compresión, siendo los porcentajes óptimos de escorias, los situados en torno al 30-40%.

Utilización de escorias negras como árido para hormigón

De forma experimental se está estudiando la posibilidad de utilizar este tipo de residuo como árido grueso ⁽²⁰⁾ o fino ^{(21) (22)} para hormigón. En ambos casos, las escorias se deben triturar y tamizar, obteniendo una granulometría similar a la de los áridos naturales. Además, se debe proceder a la estabilización y envejecimiento de las escorias para evitar su expansión.

En los ensayos realizados ^(20, 21, 22), en los que se reemplazó la totalidad de la arena por escorias negras de horno eléctrico, se obtuvieron hormigones de mayor densidad (2.770 kg/m³), con una resistencia a compresión y carga de rotura similares a los de un hormigón con arena natural y de mayor fragilidad.

Según estos estudios, el fenómeno de lixiviación en un hormigón normal y en un hormigón con escorias es similar para todos los metales excepto para el cloro.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

En el plano internacional se han desarrollado algunas recomendaciones de utilización de este tipo de áridos en hormigón estructural, como las recomendaciones japonesas ⁽⁷⁾, en las que se recogen tanto los requisitos de los áridos como las propiedades de los hormigones y recomendaciones para su proyecto y puesta en obra.

En estas recomendaciones se especifica que el uso de escorias queda limitado a aquellas escorias procedentes de plantas con un certificado de calidad en las que se realice su procesamiento y control adecuado. De acuerdo con estas recomendaciones, se puede utilizar hasta un 100% de árido grueso de escorias, en cuyo caso el porcentaje de árido fino de escorias se limita al 30% (relativo al volumen total de árido fino). Si el árido grueso es natural, el porcentaje de árido fino de escorias puede ascender al 50%. Para porcentajes mayores, se requiere la realización de estudios específicos. Quedan excluidas las aplicaciones en hormigones de resistencia superior a 60 N/mm² y hormigones pretensados.

Las escorias deben cumplir los requisitos establecidos para los áridos convencionales, debiendo ajustarse a unos husos granulométricos que se recogen en las Tablas 8 y 9:

Tamaño máximo	ÁRIDO FINO						
	% de la fracción que pasa						
	10	5	2,5	1,2	0,6	0,3	0,15
5 mm	100	95-100	80-100	50-90	25-65	10-35	2-15
2,5 mm	100	95-100	85-100	60-95	30-70	10-45	5-20
1,2 mm	-	100	95-100	85-100	35-80	15-50	10-30
5-0,3 mm	100	95-100	45-100	10-70	0-40	0-15	0-10

Tabla 8: Husos granulométricos para el árido fino procedente de escorias de acería empleadas en hormigón estructural

Tamaño máximo	ÁRIDO GRUESO						
	% de la fracción que pasa						
	50	40	25	20	15	10	5
5 mm	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-
2,5 mm	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10
1,2 mm	-	-	100	90-100	-	0-10	0-5
5-0,3 mm	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15

Tabla 9: Husos granulométricos para el árido grueso procedente de escorias de acería empleadas en hormigón estructural

En cuanto a las características de los hormigones con escorias de acería presentan una mayor demanda de agua para obtener una determinada consistencia, tanto mayor cuanto mayor es el contenido de escorias utilizadas.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

La densidad de los hormigones con sustitución total del árido fino y grueso puede alcanzar un valor de 3000 kg/m³.

La resistencia del hormigón con escorias suele ser inferior a la de un hormigón convencional a edades tempranas (hasta 3 días), aunque posteriormente, se puede obtener una resistencia similar o incluso ligeramente superior a la del hormigón convencional. Este tipo de hormigones suele presentar además una menor retracción.

Se deben utilizar aditivos aireantes para obtener un adecuado comportamiento de durabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo.

Debido al bajo contenido de sílice que presentan las escorias de acería, el riesgo de que se presenten fenómenos de reacción álcali-árido es muy reducido.

Según estas recomendaciones, los hormigones con escorias de acería presentan además, un comportamiento adecuado durante su puesta en obra, compactado y acabado.

En el caso de utilizar exclusivamente árido fino de escorias en un porcentaje inferior al 30%, el comportamiento del hormigón se puede considerar similar al de un hormigón convencional. Para porcentajes superiores de árido fino (inferior al 50%) o para la utilización de áridos gruesos de acería, las recomendaciones establecen además, criterios específicos para determinar el diagrama tensión deformación, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, retracción y densidad, así como criterios de dosificación para garantizar la durabilidad de este tipo de hormigones en diferentes clases de exposiciones ambientales.

Utilización en cementera de escorias blancas

La valorización de las escorias blancas consiste en su reutilización en empresas cementeras como materia prima para sus hornos rotativos, aunque presenta ciertas dificultades de manipulación. Debido al pobre contenido en hierro no se pueden utilizar en cementera como aporte de hierro, sino como materia prima en sustitución de la marga.

Los fluoruros aparecen en cantidades elevadas (1,4%), por lo que deberá tenerse en cuenta en la práctica, al influir negativamente en las propiedades del clínker, así como en las emisiones por razones medioambientales. Los contenidos superiores al 2% en magnesio pueden ocasionar inestabilidad de volumen por lo que su contenido está limitado por la normativa. Por este motivo el parámetro limitante es el magnesio y va a ser éste el que determine la máxima dosificación (por lo general no mayor del 5%).

Es importante que la granulometría del material sea uniforme, de tamaño reducido (menor de 50 mm), y que no se incluyan con la escoria materiales extraños como hierro y trozos de refractario, fáciles de eliminar en origen.

Por otra parte, una vez realizada la prueba en cementera con una dosificación de la escoria blanca del 5%, el análisis de las resistencias muestra valores muy similares a los obtenidos en condiciones normales de funcionamiento ⁽¹⁾.

De esta forma, los requisitos mínimos que deben cumplir las escorias para su incorporación en el proceso productivo del cemento son:

- Porcentaje de MgO inferior al 5%, valor máximo admisible por la lentitud con que se hidrata la magnesia calcinada y la dilatación que le acompaña.
- Control de la calidad medioambiental.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

3.5.- OBRAS REALIZADAS

En nuestro país se han construido tramos de prueba para analizar el comportamiento de las **escorias negras en capas de mezclas bituminosas y capas granulares**.

En el año **1998**, en la carretera GI-3610 de Zizurkil a Andoain por Aduna, de la provincia de Guipúzcoa, se realizó un tramo de prueba en el que, para el refuerzo del firme que existía, se sustituyó la mezcla convencional por una fabricada con escorias de acería de horno de arco eléctrico en una longitud de unos 500 m⁽¹⁾. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Además, en la Comunidad Autónoma del País Vasco se han realizado en los últimos años numerosos tramos de ensayo en los que se ha utilizado el árido procedente de escorias de acería de horno eléctrico en mezclas bituminosas (capas de rodadura tipo S12 y F10, y capas intermedias tipo S20) y en capas granulares (Z25). Estas actuaciones se muestran en la Tabla 10.

CARRETERA	MATERIAL	CAPA	LONGITUD	TRÁFICO	FECHA
Eje Ballonti	F-10	RODADURA (100% áridos de escoria)	300 m (en rampa) 1 calzada	T1	Septiembre de 2006
Eje Ballonti	F-10	RODADURA (gruesos escoria y finos:50% escoria y 50% caliza)	300 m (en rampa) 1 calzada	T1	Septiembre de 2006
Eje de la Ría, Carmen Galindo	PA-12	RODADURA (gruesos escoria y arena caliza)	500 m (tramo recto) 1 calzada	T1	Febrero – marzo de 2007
Acceso a Nervacero desde Ballonti	S-20	INTERMEDIA (gruesos escoria y arena caliza)	200 m 1 calzada	T2	Junio 2006
Carmen Galindo	S-20	INTERMEDIA (gruesos y arena escoria)	500 m 1 calzada	T1	De otoño a fin de año 2006
Acceso a Nervacero desde Ballonti	ZA-25	BASE GRANULAR (todo escoria) ¹	200 m 1 calzada	T2	Junio 2006
Gi – 3851	ZA-20	BASE (100% áridos de escoria)	230 m (en rampa) 2 calzadas	T4B	2006-2007
Gi – 3851	ZA-20	BASE (gruesos de escoria y finos: 50% escoria y 50 % caliza)	180 m (en rampa) 2 calzadas	T4B	2006-2007
Gi – 3851	ZA-20	BASE (gruesos de escoria y finos: 100% caliza)	210 m (en rampa) 2 calzadas	T4B	2006-2007
Gi – 2133	S-20	INTERMEDIA (100% áridos de escoria)	715 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-20	INTERMEDIA (gruesos escoria y	710 m 2 calzadas	T3A	2006-2007

1 Todo escoria: material en el que se emplea escoria cristalizada machacada como árido de granulometría continua y densa y escoria granulada como conglomerante.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

CARRETERA	MATERIAL	CAPA	LONGITUD	TRÁFICO	FECHA
		finos 100% caliza)			
Gi – 2133	S-20	INTERMEDIA (gruesos escoria y finos: 50% escoria y 50% caliza)	715 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-12	RODADURA (100% áridos de escoria)	710 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-12	RODADURA (gruesos escoria y finos 100% caliza)	740 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-12	RODADURA (gruesos escoria y finos: 50% escoria y 50% caliza)	740 m 2 calzadas	T3A	2006-2007

Tabla 10: Tramos realizados en la Comunidad Autónoma del País Vasco con áridos procedentes de escorias de de acería de horno eléctrico ⁽²³⁾

En Cataluña se han realizado también varios tramos de prueba de utilización de escorias negras en capas de firmes de carreteras ^{(16) (24)}:

- Entre junio y julio del año **2004** se construyó un tramo de ensayo en el acceso de camiones a la zona de báscula de la fábrica de CELSA. En este tramo se fabricaron dos mezclas bituminosas del tipo D12 como capa de rodadura de espesor 8 cm sobre 30 cm de zahorra artificial caliza.
- En el año **2006**, se contruyó un tramo experimental en la carretera C-13 en Balager (Lleida) en el que se puso en obra una mezcla D12 cuya fracción granular superior a 4 mm estaba compuesta de árido siderúrgico. En este mismo año se realizó un tramo experimental en la calle Molist de Barcelona, con muy fuerte pendiente.
- En junio de **2007**, en un tramo de la N-IIa en Lleida y para tráfico T0, se pusieron en obra cuatro mezclas tipo M-10 en capa de rodadura, variando la proporción del árido grueso siderúrgico.
- En noviembre de **2007**; en la autovía A-2, tramo Fornells-Aeropuerto de Gerona, con tráfico T0, se pusieron en obra, 15.000 t de mezcla bituminosa tipo M10 con proporciones variables de árido grueso siderúrgico, que llegaron a alcanzar el 75% de esa fracción.
- En abril de **2010**, se extendieron mezclas bituminosas con árido siderúrgico en el Polígono Riu Sec de Sabadell, pavimentándose una superficie aproximada de 25.000 m². El árido siderúrgico se incorporó en diferentes proporciones en la capa de rodadura, donde se empleó una mezcla AC 16 surf D hasta sustituir el 100% del árido natural.

En el País Vasco se llevó a cabo una experiencia práctica, a escala industrial, de **utilización de escorias en el proceso de fabricación de cemento** ⁽¹⁾. Los resultados que se obtuvieron en este proyecto demostraron que con unos porcentajes adecuados de escorias, la calidad del producto final no varía.

Este mismo estudio estimó la capacidad de incorporación de escorias para su utilización en cementeras (considerando una dosificación media igual a la utilizada en la prueba a escala

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

industrial) obteniendo los siguientes resultados: 85.000 t/año para las escorias negras y unas 100.000 t/año para las escorias blancas.

En relación a la **utilización de escorias negras en hormigón**, los estudios realizados han dado lugar a las primeras aplicaciones en España. Hay que destacar el proyecto 'Kubik' (**2008**), en el que han colaborado la empresa Financiera y Minera (FYM), el centro tecnológico Labein-TECNALIA y la empresa Hormigones y Morteros Agote Hormon. Este proyecto ha consistido en la construcción de la nueva infraestructura de Labein-Tecnalia en el Parque Tecnológico de Vizcaya ⁽²⁵⁾. En este proyecto se ha utilizado árido siderúrgico en diferentes elementos estructurales, tales como losas de cimentación (HA-30/F/20/IIa+Qa) y muros de sótano (HA-30/B/20/IIa+Qa). En la actuación realizada, cabe destacar los siguientes aspectos:

1. Ejecución de un hormigón con el 80% (volumen) de áridos siderúrgicos.
2. Colocación, sin interrupción, de más de 140 metros cúbicos.
3. Bombeo continuado de dos series de 140 y 50 metros cúbicos, respectivamente.
4. Viabilidad de valorización completa de más de 800.000 toneladas/año de escorias negras tratadas en la CAPV.
5. Diseño de una losa de hormigón con áridos siderúrgicos (HAS) capaz de resistir 3.000 toneladas por metro cuadrado.

Por otra parte, el edificio del Centro de Investigación en Tecnologías Industriales (CITI) de la Universidad de Burgos será la primera realización en su tipo que albergue diferentes elementos estructurales y no estructurales de hormigón realizado con áridos siderúrgicos (HAS). Será un edificio de uso público, habitable y permanente, que dedicado a la Investigación Universitaria, ha sido diseñado y construido con criterios innovadores en lo que a sostenibilidad y reciclado se refiere. Partes importantes de su cimentación han sido concebidas con hormigones elaborados con escorias de acería de horno de arco eléctrico, varios de sus muros estructurales de fachada también están ejecutados con estos hormigones, y en este caso además son hormigones especiales coloreados y cuya terminación arquitectónica presenta texturas ricas en matices. Finalmente sus soleras contienen hormigones de áridos siderúrgicos con fibras de polipropileno que mejoran sus características resistentes a flexotracción. La obra del edificio es fruto de la colaboración entre la propia Universidad de Burgos, a través de su grupo de investigación GITE, el estudio de arquitectura ESPARAVEL de Madrid y las empresas SIKA, suministradora de aditivos para hormigones, HORMOR (Hormigones y Morteros Agote) de Zestoa (Guipúzcoa) como productor/gestor de los áridos siderúrgicos y encargada de su transformación y suministro y la constructora INTERSA.

4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

En España, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados establece en su artículo 6 que la determinación de los residuos que han de considerarse como residuos peligrosos y no peligrosos se hará de conformidad con la Lista Europea de Residuos (LER) establecida en la Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000.

Las escorias de acería de horno de arco eléctrico vienen incluidas en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" con los siguientes códigos:

- 10 02 01 Residuos de tratamiento de escorias.
- 10 02 02 Escorias no tratadas.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

El correcto tratamiento de estos materiales supone una serie de beneficios de carácter global, tanto desde el punto de vista de sus generadores como desde el punto de vista social:

- Una disminución de los costes de vertido, a la vez que un ahorro de materia prima natural derivado de la reutilización de los subproductos de acería.
- Reducción del impacto medioambiental y un beneficio espacial al mantener los vertederos sin ocupar, no depositando los residuos en vertedero.
- Incremento de la calidad de vida en los alrededores de este tipo de industrias.

Desde el punto de vista medioambiental, las escorias negras de acería de horno de arco eléctrico se pueden utilizar **en capas granulares** (como bases, subbases y coronación de explanadas) siempre y cuando 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.

Los lixiviados pueden corroer las tuberías de aluminio y acero que se coloquen en contacto con ellos.

Se recomienda especialmente controlar la lixiviación de Mo, V, Se y fluoruros. En España, tan sólo tres Comunidades Autónomas (el País Vasco, Cataluña y Cantabria) establecen umbrales máximos de lixiviación para dicho flujo residual.

Muestras	Valor Límite
Bario (mg Ba/kg)	17
Cadmio (mg Cd/kg)	0,009
Cromo (mg Cr/kg)	2,6
Molibdeno (mg Mo/kg)	1,3
Níquel (mg Ni/kg)	0,8
Plomo (mg Pb/kg)	0,8
Selenio (mg Se/kg)	0,007
Vanadio (mg V/kg)	1,3
Zinc (mg Zn/kg)	1,2
Fluoruros (mg F-/kg)	18
Sulfatos (mg SO4/kg)	377

Tabla 11: Concentraciones máximas permitidas en el País Vasco para los lixiviados de escoria negra obtenidos según ensayo de lixiviación UNE-EN 12457-3:2003

Cuando se utilicen las escorias **como áridos en mezclas bituminosas para capas de rodadura** de firmes se deberá también comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación cumplen las especificaciones fijadas. En el País Vasco se establece que los elementos que se tienen que controlar son el Cd y el Se que no deberan superar concentraciones de 0.6 mg/kg y 0.2 mg/kg, respectivamente. En cualquier caso, se ha podido demostrar que el árido siderúrgico envuelto en una matriz bituminosa emite solamente una fracción pequeña de elemento lixiviado, satisfaciendo los resultados de las normativas ambientales más exigentes

(16)

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

5.- ASPECTOS ECONÓMICOS

Hasta llegar a los primeros pasos para su valorización, en España la escoria negra se ha transportado desde su salida del horno y enfriamiento a los vertederos de residuos inertes. Hasta la fecha no existen unos precios estipulados en la venta de este material para la obtención de áridos siderúrgicos.

Las escorias blancas tienen como principal vía de valorización su empleo en cementeras. Tradicionalmente se han mezclado con las escorias negras y se llevaban a vertedero.

En algunos municipios el precio del vertido de residuos es de tarifa única. Sin embargo, lo general en otros municipios es establecer la tarifa dependiendo de la naturaleza del material. Como ejemplo representativo, en el vertedero de Aizmendi en Guipúzcoa se establecía como tarifa de vertido de escorias 39,00 euros / t. Siguiendo el principio de “quien contamina paga”, cada vez existe una mayor diferencia en las tasas de vertido dependiendo del tipo de residuo, penalizando el vertido de residuos mezclados.

Debido a la alta densidad de los áridos procedentes de este tipo de escorias, en torno a 3,6 gr/cm³, el transporte a obra se ve encarecido con respecto a los áridos convencionales.

6.- NORMATIVA TÉCNICA

Europa

- Consejo de la Unión Europea. “Decisión del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE” (Diario Oficial de las Comunidades Europeas - 16.1.2003).

España

- **UNE-EN 12620: 2003+ A1: 2009.** “Áridos para hormigón”.
- **UNE-EN 13043: 2003/ AC: 2004.** “Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas”.
- **UNE-EN 13242: 2003+A1:2008.** “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes”.

Las normas europeas armonizadas UNE-EN 13043 y UNE-EN 13242 hacen mención expresa a la utilización de áridos procedentes de las escorias de acerías de horno eléctrico. En ambas normas, se indica que se debe controlar la estabilidad de volumen de estos áridos, de acuerdo con el ensayo recogido en el apartado 19.3 de la Norma Europea EN 1744-1, y se establecen diferentes categorías. En los anexos de Control de producción en fábrica se establecen las frecuencias mínimas de ensayo para determinar la estabilidad en volumen de los áridos siderúrgicos de acería. También se hace referencia a este tipo de áridos en el Anexo ZA (Informativo), en los que se recogen los campos de aplicación de los productos y los requisitos aplicables.

- **UNE-EN 197-1:2000. A3:2008.** “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes”.
- **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes**

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

(PG-3). Los artículos a los que se hace referencia, en la nueva redacción dada a algunos de ellos en la orden FOM/2523/2014 (BOE de 3 de enero de 2015), son los siguientes: Artículo 330 “Terraplenes”.

- **Artículo 510 “Zahorras”** En el apartado 510.2.2.1 (Áridos , Características generales) se establece que para las categorías de tráfico pesado T2 a T4 se podrán utilizar **áridos siderúrgicos** siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en el artículo, se declare el origen de los materiales y las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares (PPTP).

Los áridos siderúrgicos deben someterse a un proceso previo de machaqueo, cribado y eliminación de elementos metálicos y otros contaminantes, tras el cual se deberán envejecer con riego por agua durante un periodo mínimo de 3 meses. Además, el árido siderúrgico de acería deberá presentar una expansividad inferior al 5% (UNE-EN 1744-1), siendo la duración del ensayo de 24 horas si el contenido de MgO es no superior al 5% y de 178 horas en los demás casos; el Índice Granulométrico de Envejecimiento (IGE) (NLT-361) será inferior a l 1% y el contenido de cal libre (UNE-EN 1744-1) inferior al 0.5%.

En el apartado 510.2.2.3.4 (Áridos, Árido grueso, Resistencia a la fragmentación) se indica que para materiales reciclados procedentes de capas de firmes de carretera, así como para áridos siderúrgicos, el valor del coeficiente de Los Ángeles deberá ser inferior a 35 para categoría de tráfico pesado T00 a T2 y a 40 para T3, T4 y arcenes (5 unidades por encima de los exigidos para el resto de los áridos), siempre que su composición granulométrica se adapte al uso ZAD20 que figura en el pliego.

- Artículo 542 “Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso”. En el apartado 542.2.3.1 (Áridos, Características generales) se indica que los áridos a emplear en las mezclas bituminosas podrán ser de origen natural, artificial (entre los que se encuentran los áridos siderúrgicos procedentes de escorias de acería de horno de arco eléctrico) o reciclado siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo.
- Artículo 543 “Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas”.El apartado 543.2.3.1 (Áridos, Características generales) contiene un párrafo similar al expuesto del artículo 542.
- **Artículo 550 “Pavimentos de hormigón”**. En el apartado 550.2.4.1 (MATERIALES, Áridos, Características generales) se establece que en la capa inferior de los pavimentos bicapa se podrán utilizar áridos siderúrgicos siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo y se declare el origen de los materiales. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el PPTP

En el apartado 550.2.4.2.1 (Áridos, Árido grueso, Características generales) se indica que aunque con carácter general el coeficiente de los Ángeles deberá ser inferior a 35, cuando en la capa de hormigón inferior de los pavimentos bicapa se empleem áridos siderúrgicos, se admitirá para ellos un valor del coeficiente de Los Ángeles

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

inferior a 40.

- **Artículo 551 “Hormigón magro vibrado”.** En este artículo, los apartados correspondientes tienen el mismo contenido que en artículo 550, en lo referente a la utilización de áridos siderúrgicos.
- Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente de la **Comunidad Autónoma del País Vasco**. “**Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico**” (BOPV 26 de febrero de 2003).
 - Incluye valores límites de lixiviación, según ensayo prEN-12457 (parte 3) (UNE-EN 12457) (Anexo 2). En función de la aplicación, deberán compararse los resultados con los límites establecidos en la Tabla A (explanadas, bases y subbases de carreteras) o con los límites de la Tabla B (capa de rodadura) (Anexo 3).
- **Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco (2012)**. Anejo 3: Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para mezclas bituminosas. Anejo 4: Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para zahorras.
 - El contenido de cal libre del árido siderúrgico debe ser inferior al 0,5%, tanto como para su uso en zahorras como en mezclas bituminosas (Anejo 3).
- Departamento de Medio Ambiente de la **Generalitat de Cataluña**. “**Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre valorización de escorias siderúrgicas**”.
 - Se establecen los requisitos medioambientales (valores límites de lixiviación, según la norma EN 12457-4:2002(L/S= 10 l/kg), el procedimiento administrativo para la valorización de las escorias siderúrgicas y las obligaciones de los productores, tratadores y usuarios de estas escorias.
 - Se establecen las consideraciones que se deben tener en cuenta en los distintos usos admisibles para las escorias siderúrgicas valorizables como áridos en obra civil:
 - Como base, subbase y explanada mejorada de carreteras.
 - En la nivelación de terrenos y terraplenes.
 - En relleno y restauración de áreas degradadas por actividades extracitas sobre suelos arcillosos.
 - Como material para capa de rodadura con mezcla bituminosa.
 - Como subbalasto de vías férreas.
 - En el relleno interior de cajones de hormigón cerrados.
- Consejo de Gobierno de la **Comunidad Autónoma de Cantabria**. “**Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias**” (BOC Núm 206 – 26 de octubre de 2006).
 - Se refiere a las escorias negras y blancas procedentes de las acerías de horno eléctrico y a las escorias de ferroaleaciones de ferrosilicomanganeso.
 - Se entenderá que una escoria es valorizable cuando los resultados de los análisis obtenidos según la norma EN 12457-4 den valores que no sobrepasen los establecidos en el Decreto.
- **Ministerio de Fomento**. “**Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)**”.2008.
- **NLT – 361/91**. “**Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería**”.

Reino Unido

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

- **Highways Agency et al. (2005):** Conservation and use of secondary and recycled materials, **HD35/04** (Conservación y utilización de materiales secundarios y reciclados).
 - Admite las escorias de acería en determinadas aplicaciones, siempre que se cumplan las especificaciones de la serie correspondiente de las SHW (Specification for Highway Works), donde se hace referencia a la utilización de escorias de acería de horno eléctrico en las siguientes series: Series 600 (Explanada), Series 800 (Firmes de carreteras-Materiales granulares, tratados con cemento y otros conglomerantes hidráulicos), Series 900 (Firmes de carreteras-Materiales bituminosos).

Alemania

- **TL Gestein-StB (2004):** Technische Lieferbedingungen für Gesteinskornungen im Straßenbau (Condiciones técnicas de suministro para áridos en la construcción de carreteras).
 - Se admite la posibilidad de utilización de escorias de acería en capas granulares, capas tratadas con cemento y en mezclas asfálticas y tratamientos superficiales. No se admite su utilización en hormigones.
 - Se establecen para las escorias de acería las siguientes categorías exigibles en cuanto a su estabilidad en volumen:
 - Capas granulares: V_5
 - Capas tratadas con cemento: V_5
 - Mezclas asfálticas y tratamientos superficiales: $V_{3,5}$
 - En un anejo del documento se incluyen las propiedades de relevancia medioambiental, indicándose los valores exigidos en la composición de los eluatos a las diferentes categorías de las escorias de acería en el marco de los ensayos iniciales tipo y el control de calidad. La división en tres categorías de escorias de acería se corresponde con tres posibilidades de utilización que se refieren a la norma **Rua-StB 01 (2001)**.
- **Rua-StB 01 (2001):** Richtlinien für die umweltverträgliche anwendung von industriellen nevenprodukten und recycling-baustoffem im straßenbau (Directrices para la utilización compatible con el medio ambiente de subproductos industriales y materiales de construcción reciclados en la construcción de carreteras y caminos).

Francia

- **XP P 18-545:** Granulats: éléments de définitions, conformité et codification (Áridos: elementos de definición, conformidad y codificación).
 - Establece las siguientes categorías para la estabilidad volumétrica de las escorias de acerías, en función de dónde vayan a ser utilizados los áridos:
 - En mezclas bituminosas: $V_{3,5}$ (expansión $\leq 3,5\%$, en volumen)
 - En gravas no tratadas: V_5 (expansión $\leq 5\%$, en volumen)
 - Tratamientos superficiales: $V_{6,5}$ (expansión $\leq 6,5\%$, en volumen)
 - Indica que, en el estado de conocimiento actual, no se recomienda la utilización de estos áridos en capas tratadas con conglomerantes hidráulicos.

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

Japón

- "Recommendations for design and construction of concrete structures using electric arc furnace oxidizing slag aggregate" (Recomendaciones para el uso de áridos procedentes de escorias de acería de horno de arco eléctrico oxidadas en el diseño y construcción de estructuras de hormigón). Japan Society of Civil Engineers, 2004.

7.- REFERENCIAS⁰⁰

- [1] IHOBE, S.A., Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería". Febrero, 1999.
- [2] ETXEBARRIA, M.; PACHECO, C.; MENESES, J.M.; BERRIDI, I.: "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregate". Construction and Building Materials. Vol. 4. 2010, pp 1594-1600.
- [3] RUBIO M.D.; CONTRERAS, F.; PARRÓN, M.A.; RUBIO, F.. "Resistencia mecánica de hormigones con sustitución de un porcentaje de cemento por polvos de humo y escoria de horno de arco eléctrico". V Congreso ACHE. Octubre 2011. Barcelona.
- [4] MANSO, J.M.; GONZÁLEZ J.J.; POLANCO J.A.: "Electric arc furnace slag in concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No. 6, Diciembre 2004.
- [5] PRIETO BARRIO, M.I.; COBO ESCAMILLA, A.; RODRÍGUEZ SÁIZ, A.; MANSO VILLALÍN, J.M.: "Estudio de la corrosión de armaduras embebidas en morteros fabricados con sustitución parcial y total de áridos por escorias blancas de horno cuchara". V Congreso de la Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural, Octubre 2011.
- [6] FRÍAS, M.; SAN JOSÉ, J.T.; VEGAS, I.: "Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos". Materiales de Construcción, Vol. 60, 297, pp 33-66, enero-marzo 2010.
- [7] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. "Recommendations for design and construction of concrete structures using electric arc furnace oxidizing slag aggregate". 2004. ISBN 4-8106-0478-0.
- [8] TOMASIELLO, S.; FELITTI, M.: "EAF Slag in self-compacting concretes". Architecture and Civil Engineering. Vol8. Nº1. 2010. pp 13-21.
- [9] EMERY, J.J. "Slag Utilization in Pavement Construction", Extending Aggregate Resources. ASTM Special Technical Publication 774, American Society for Testing and Materials. Washington, DC, 1982.
- [10] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". 1997.
- [11] GUPTA, J.D. and KNELLER, W.A."Precipitate Potential of Highway Subbase Aggregates". Report No. FHWA/OH-94/004, Prepared for the Ohio Department of Transportation. November, 1993.
- [12] PROYECTO CLEAM. Informe ejecutivo de resultados de la subtarea 2.3.2.: Reutilización y reciclado de escorias, residuos urbanos y arenas de fundición. 2011.
- [13] PROYECTO CLEAM. IV Jornadas Técnicas – Final Proyecto (19 de mayo de 2011). Subtarea 2.3.2.: Reutilización y reciclado de escorias, residuos urbanos y arenas de

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

fundición. 2011.

- [14] PROYECTO FÉNIX. “Comité Técnico Extraordinario. Resumen de las presentaciones”. Lérida, 22 y 23 de noviembre de 2010.
- [15] CARMONA, M.; IZQUIERDO, S.; ÁVILA, J.M.; LAIRADO, S. (2011): “Escorias siderúrgicas valorizadas en obra civil”. VI Jornada Nacional de ASEFMA.
- [16] SCHEIBMEIR, E.; ORTIZ, J.; BOU, M.: “Mezclas bituminosas de granulometría continua elaboradas enteramente con árido siderúrgico”. VI Jornada Nacional de ASEFMA. 2011.
- [17] BOSELA, P.; DELATTE, N.; OBRATIL, R.; PATEL, A.: “Propiedades para firmes del hormigón fabricados con áridos siderúrgicos”- Revista Carreteras nº 166. 2009.
- [18] KOUROUNIS, S; TSIVILIS, S; TSAKIRIDIS, P.E; PAPADIMITRIOU, G.D and TSIBOUKI, Z.: “Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag”. Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 6, June 2007, pp 815-822.
- [19] EGMASA (Empresa de Gestión Medioambiental, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía). “Estudio de viabilidad de las escorias siderúrgicas como sustitutivos de los áridos en la fabricación de morteros”. 2004.
- [20] MANSO VILLALÁIN, J.M.; MARQUÍNEZ, J.S.: “Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF). La oportunidad de los hormigones”. Hormigón y Acero. Nº.241, 3^{er} trimestre 2006. pp 51-57.
- [21] OZKUL, M. H. “Properties of slag aggregate concretes”. Concrete for Environment Enhancement and Protection, p. 553-558. Edited by R K Dhir and T D Dyer. Published by E&FN Spon. 1996.
- [22] “Waste materials in construction. Putting Theory into Practice”. Proceedings of the International Conferences on Environmental Implications of Construction with Waste Materials, WASCOM 97. Published by ELSERVIER. The Netherlands, June, 1997.
- [23] FONSECA, A. I., Gobierno Vasco. “Escorias de acería como árido para la construcción de carreteras”. Jornada sobre Aplicación de Residuos en Carreteras. Barcelona, octubre, 2007.
- [24] BARRA, M., Universidad Politécnica de Cataluña. “Las escorias de acería en Cataluña”. Jornada sobre Aplicación de Residuos en Carreteras. Barcelona, octubre, 2007.
- [25] <http://edificacionindustrializada.com/2009/01/13/fym-labein-tecnalia-y-la-empresa-hormor-desarrollan-un-hormigon-con-arido-siderurgico-para-la-nueva-infraestructura-experimental-kubik/>

FICHA TÉCNICA	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2013
ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO		

8.- ENTIDADES DE CONTACTO

- UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas)
c/ Castelló nº 128 – 3º
28006 Madrid
Tel. 91 5624018
- IHOBE, S.A. (Sociedad Pública de Gestión Ambiental)
c/ Ibáñez de Bilbao nº 28 – 8º
48009 Bilbao
Tel. 94 4230743
Fax 94 4235900
<http://www.ihobe.net/>