

ESCORIAS DE ACERÍA LD

Nombre en inglés: Basic Oxygen Furnace Slag (BOF-slag o BOS-slag)



ESCORIA DE ACERÍA LD

1.- ORIGEN ^(1, 2)

Las escorias de acería LD se originan en el proceso de afinado del arrabio obtenido en el alto horno, eliminándose por oxidación, en todo o en parte, las impurezas existentes.

En el procedimiento Linz-Donawitz (LD) para la transformación de la fundición de hierro procedente del horno alto en acero, el afino se lleva a cabo inyectando oxígeno a presión en el baño que contiene las materias primas y las adiciones para la formación de escoria (fundamentalmente cal, dolomía y espato). El oxígeno se insufla mediante una lanza refrigerada hasta conseguir eliminar del arrabio el exceso de carbono y las impurezas que lo acompañan. El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO_2) y el resto de impurezas queda en forma de escoria semipastosa que sobrenada por encima del acero; ello permite separar la escoria de este por gravedad y enviarla a un foso donde se riega hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50°C .

La escoria tiene, por tanto, como misión fundamental atrapar las impurezas, principalmente fósforo y azufre. Por cada carga de fundición se añade 75-80 kg de cal y dolomía y se retiran de 120 a 130 kg de escoria. La producción de escoria LD representa un 10% en peso de la producción de acero.

Finalizada la operación, el acero colado es transportado para su completo afinado y ajuste de composición química y temperatura. En estas operaciones finales se añaden las ferroaleaciones (manganeso, cromo, níquel, etc.), según el acero que se quiera fabricar.

2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

Los únicos hornos altos en España se encuentran en Gijón (Asturias) y pertenecen a ArcelorMittal, S.A., que es también la propietaria de las dos acerías de tipo LD existentes, localizadas en Avilés y Gijón.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

La producción total de escorias de acería LD durante el año 2.005 se estimó en 585.000 t. Durante 2007 la producción total de escorias de acería LD fue de 573.000 t, de las que 79.000 t se emplearon internamente, 70.000 t se emplearon en distintas aplicaciones (41.000 t en consolidación de residuos en vertederos de RSU, 26.000 t en rellenos y 7.000 t en la industria del asfalto), el resto, 424.000 t se almacenaron ⁽³⁾.

En España, debido a la crisis la industria viene afrontando un continuado descenso en la actividad consumidora del acero en general. La industria de la siderurgia desde el tercer trimestre de 2008 viene acumulando un descenso interanual de la demanda nacional, especialmente del sector de la construcción, excepto durante el segundo trimestre de 2010 en el que se impulsó el consumo debido a la subida del IVA. El entorno de consumo empeoró en la segunda mitad de 2011 debido por un lado a las inestabilidades financieras en toda Europa, y por otro a la fuerte presión exportadora de China y el descenso de los precios de las materias primas, por lo que se ha debido realizar un ajuste de la producción de acero en general ⁽⁴⁾.

En 2008, según datos de UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas), en España se produjeron en torno a 500.000 t de escorias de acería LD ⁽⁵⁾.

Datos obtenidos del BOPA (Boletín Oficial del Principado de Asturias, nº 192 de agosto de 2009), indican que las cantidades estimadas, no limitativas, de escorias y escombros de acería LD que se producen anualmente en las instalaciones de Avilés y de Gijón son de 360.000 t y de 80.000 t, respectivamente. En la tabla 1 se refleja la producción de escorias de acería LD en España, durante los años en los que se ha obtenido información.

ESPAÑA Producción escorias de acería LD (kt)				
	2005	2007	2008	2009
Producidas	585	573	500	440
Valorizadas	-	70	-	-

Tabla 1: Producción de escorias de acería LD en España

La Asociación Europea de Escorias, EUROSLAG, realiza encuestas entre los productores de acero europeos cada dos años, de las que se han podido extraer los siguientes resultados: en el año 2006 se produjeron 16,67 millones de toneladas (Mt) de escorias de acería LD en Europa, en el año 2008 se produjeron 9,5 Mt y, en el año 2010 la cantidad fue de 10,46 Mt ⁽⁶⁾.

EUROPA: Producción Escorias de Acería LD (Mt)		
2006	2008	2010
16,67	9,5	10,46

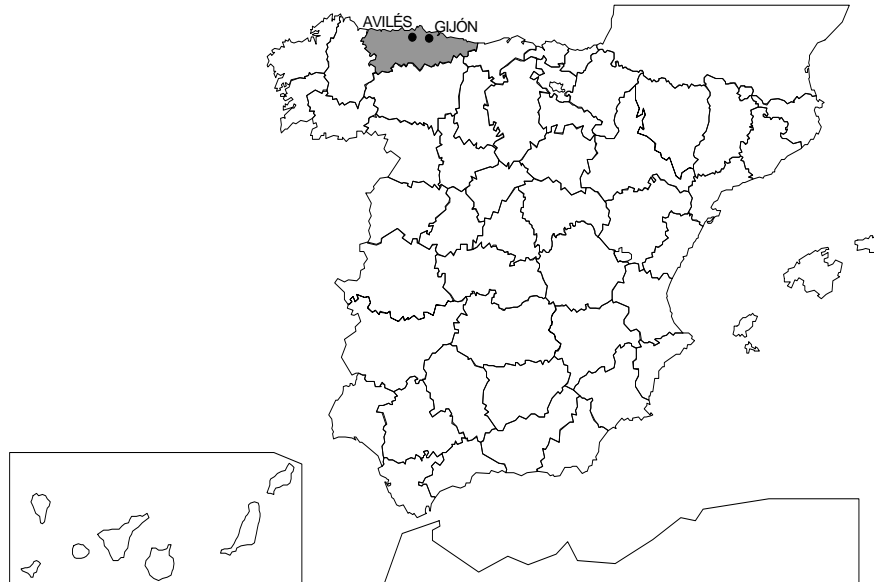
Tabla 2: Producción de escorias de acería LD en EUROPA

China es el primer productor mundial de acero, concretamente en Taiwán, la industria pesada de fabricación de acero se ha desarrollado de una forma rápida. Datos estadísticos indican que la Corporación China del Acero genera aproximadamente al año 120 Mt de escorias de acería LD ⁽⁷⁾.

ESCORIAS DE ACERÍA LD

LEYENDA

Provincia con hornos altos y acerías LD.



3.- VALORIZACIÓN

La Directiva comunitaria 2008/98/CE de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos, define valorización como cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general.

A diferencia de otros subproductos generados durante la fabricación de acero, como por ejemplo las escorias de alto horno, el empleo de escorias de acería LD ha sido menor debido a la insuficiente estabilidad volumétrica y a la falta de regulación medioambiental existente⁽⁸⁾.

3.1.- PROPIEDADES^(1,2)

Propiedades Físicas

La escoria de acería LD es un material de tipo granular, de color gris claro en estado seco, que tiene una cierta porosidad y textura rugosa. Las partículas tienen forma cúbica, con escasa presencia de lajas. Tiene una densidad aparente elevada, del orden de 3 t/m³ o algo superior, consecuencia de su contenido en hierro, que se da tanto en la forma de metal libre como combinado en óxidos. La granulometría aproximada es 0/300. La absorción de agua es moderada (inferior al 3%).

Propiedades Químicas

La escoria de acería LD tiene una composición química muy diferente de la de las escorias de alto horno; en particular, contiene menos alúmina y sílice y bastante más cal, una parte de ella en forma libre; además, contiene una importante proporción de óxidos de hierro. El contenido

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

en CaO está comprendido entre el 45 y 50%, siendo ésta, quizá, la propiedad química más importante desde el punto de vista de su utilización en la construcción de carreteras, pues hace que las escorias presenten alta higroscopicidad, lo que favorece la hidratación de la cal que se transforma en hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , que puede causar expansión al mismo tiempo que disgregación del material. Las escorias de acería contienen más hierro, tanto en su forma libre como combinada en óxidos, que las escorias de alto horno, lo que incrementa la densidad de este material. Por el contrario, el contenido de azufre total es bajo. El pH de las escorias de acería LD es alcalino ($\text{pH} > 11$ ó 12).

Propiedades Mecánicas

Las escorias de acería tienen muy buena angulosidad y una elevada dureza (6-7 en la escala de Mohs), así como una elevada resistencia al corte y a la abrasión, si bien estudios recientes muestran que la velocidad en el proceso de enfriamiento de la escoria puede afectar a las características físicas mencionadas anteriormente, así como a su composición química y mineralógica, pudiendo haber cierta variabilidad en las características esperadas del material ⁽⁹⁾.

3.2.- PROCESAMIENTO ^(1,2)

La escoria, que se encuentra en forma semipastosa sobrenadando por encima de acero, se separa de éste y se envía a un foso, donde se riega hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50°C , y se transporta a la planta de procesado. Allí se separan, mediante electroimanes, las chatarras superiores a 80 mm, pasando el material restante a la instalación de machaqueo. Mediante machacadoras de mandíbulas y molinos de conos se reducen a tamaños inferiores a 50 mm. De esta escoria se elimina de nuevo el hierro mediante electroimanes y se clasifica en distintos tamaños. El procesado se completa, en su caso, con el envejecimiento de la escoria en parque, regándola con agua para conseguir hidratar los elementos inestables.

3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO ⁽²⁾

Composición química y mineralógica

En la tabla 2 se presenta la composición química media de una escoria de acería tipo LD-III, que fue objeto de un estudio encargado por ENSIDESA al CEDEX en 1990. Estos datos corresponden al análisis medio de 1000 coladas y la variación que se encontró entre los valores puntuales no fue muy importante

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	F _e TOTAL	MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cu	Mo	As	Cd	B
%	48,00	16,00	1,20	5,20	16,04	5,90	0,20	0,50	0,03	0,08	< 1 ppm	< 0,5 ppm	0,17

Tabla 2: Composición química media de la escoria de la acería LD-III

Desde el punto de vista mineralógico las escoria LD presenta en su composición diferentes fases: silicatos bi y tricálcico, wustita —combinación de óxido de hierro y manganeso (FeO y MnO)—, ferrito bicálcico y cal, más o menos impregnada de óxidos metálicos, responsable de la presencia de cal libre.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

En la tabla 3 se presenta los principales elementos químicos a tener en cuenta en función de sus posibles aplicaciones⁽¹⁰⁾.

	Si	MN	P	Fe	Mg	Ca	Al
Carreteras					Bajo	Bajo	
Hormigones					Bajo	Bajo	
Cerámica						Bajo	
Clinker				Bajo		Alto	Alto
Corrector de acidez	Bajo					Alto	

Tabla 3: Elementos químicos a tener en cuenta a la hora de valorar la escoria en distintas aplicaciones

Inestabilidad volumétrica

La presencia en la escoria de cal libre, y de magnesia en menor medida, constituye un factor potencial de inestabilidad. Estos óxidos tienden a hidratarse desprendiendo calor y produciendo un hinchamiento que puede provocar la disgregación del material y la evolución de la granulometría hacia tamaños más pequeños. Este fenómeno puede producirse en el transcurso de pocas semanas o de varios meses, según se produzca la hidratación de la cal o magnesia libre.

En este sentido, el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, puso a punto en 1990 la norma NLT-361/91 "Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería", para caracterizar en laboratorio las escorias de acería en relación con su posible expansión.

El procedimiento más utilizado para reducir al mínimo los fenómenos de inestabilidad volumétrica es el de envejecer la escoria, en parte machacada y en su estado final, regándola con agua natural, salada, acidulada o agua caliente para conseguir hidratar los elementos inestables. Se ha comprobado que el envejecimiento al aire sin riego de agua no ofrece garantías y, por otra parte, se ha comprobado que los montones deben tener una altura máxima de 1,5 – 2 m.

El contenido de la cal libre puede variar para distintas escorias entre el 1% y el 15%. Los límites por debajo de los cuales puede considerarse segura la utilización de la escoria dependen del uso que se pretenda dar. Si se utiliza en capas granulares, los límites empleados oscilan entre el 4% y el 7%, según los países; para aplicaciones en capas bituminosas, en las que los áridos quedan impermeabilizados por una película de betún, algunos países permiten el empleo de escoria sea cual sea el contenido de cal.

Propiedades físicas

La escoria de acería LD se caracteriza por ser un árido muy limpio, pesado, anguloso, poco pulimentable y de gran dureza.

En la tabla 4 se resumen las características físicas de la escoria LD-III ensayada en el CEDEX, sobre las fracciones 5/10 y 10/20 suministradas por ENSIDESA, adecuadamente combinadas

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

para obtener las granulometrías y tamaños especificados en los ensayos. Los resultados que se presentan no son de aplicación general a todas las escorias de acería que, si bien tienen en común su gran dureza pueden presentar coeficientes de pulido acelerado mucho menores. ⁽⁹⁾Esta propiedad podría estar estrechamente relacionada con las posibles variaciones en el proceso de producción del acero.

ENSAYO	RESULTADO
Partículas con dos o más caras de fractura	100 %
Limpieza superficial	0,02 %
Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Angeles	14,6 %
Pulimento acelerado de los áridos	0,55 %
Índice de lajas	7 %
Peso específico de las partículas	3,45 t/m ³
Porosidad (Aceite de parafina)	4,33 %

Tabla 4: Características físicas de la escoria LD-III ensayada en el CEDEX, sobre las fracciones 5/10 y 10/20

⁽⁵⁾En la siguiente tabla (tabla 5) se presentan las propiedades físicas de una escoria de acería LD empleada en un estudio, realizado en 2010 en China, para su uso en mezclas asfálticas. La escoria LD se trató previamente mediante un procedimiento mejorado consistente en tres fases: aglomeración, enfriamiento y desintegración. Este nuevo método de estabilización produciría una escoria más estable, con menos partículas planas y alargadas y, con cerca del 100% de la superficie machacada. Los datos de la escoria se compararon con los del árido natural (granito) empleado junto con la escoria en la mezcla estudiada. El tamaño máximo de las partículas de ambos materiales fue de 12,5 mm.

PROPIEDADES FÍSICAS	Escoria Acería LD	Árido Natural
Partículas con tres o más caras de fractura	96,20 %	54,30 %
Resistencia al desgaste de los Angeles	13,24 %	28 %
Índice de lajas (por encima 1:3)	0,9 %	9,8 %
Peso específico de las partículas	3,40 t/m ³	2,61 t/m ³
Absorción de agua	2,61 %	1,76 %

Tabla 5: Características físicas de la escoria de acería LD estudiada para su empleo en una mezcla asfáltica

La escoria LD tiene una estructura más porosa, por lo que presenta una mayor absorción de agua; posee valores bajos de resistencia al desgaste de los Ángeles y del índice de lajas y, un valor cercano al 100% de caras fracturadas. Estas características proporcionarían una fuerte trabazón en los áridos e incrementarían la resistencia a la rotura, lo que sería beneficioso para su empleo en carreteras con tráfico pesado.

3.4.- APLICACIONES

Las escorias de acería LD están siendo utilizadas en España y en otros países con acerías como: Alemania, Austria, Bélgica, Brasil, Canadá, China, Francia, Inglaterra, Japón, Suecia y USA (11) a (19). En Japón, la tasa de reciclado es cercana al 100% (fuente: Nippon Slag Association)

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

Las aplicaciones más importantes de la escoria de acería LD son en obra civil como árido de calidad y en agricultura. En agricultura se usa como corrector de acidez dado su alto contenido en calcio que hace que su pH sea muy elevado, pudiendo neutralizar pH ácidos.

3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes

La escorias de acería LD se podrían utilizar en la construcción de rellenos y terraplenes pero no está extendido su empleo.

3.4.2.- Carreteras ^(2,11)

En la técnica de carreteras, las escorias de acerías LD se utilizan como áridos para bases y subbases granulares, mezclas bituminosas, lechadas o tratamientos superficiales.

Este material no debe emplearse en capas tratadas con conglomerantes hidráulicos o en aplicaciones donde vaya rigidamente confinado, ya que en las que pequeñas expansiones pueden producir deterioros importantes.

En su aplicación como árido en capas granulares, y especialmente en bases de carreteras, se debe someter al material a un proceso de envejecimiento previo, con la granulometría con la que vaya a ser empleado, de forma que el contenido de cal libre no rebase un porcentaje entre el 4% y 5%; antes de su utilización deberá controlarse la estabilidad volumétrica de la escoria mediante un ensayo de hinchamiento.

La aplicación más clara en la técnica de carreteras es como árido en capas de rodadura de mezclas bituminosas o tratamientos superficiales, donde no sólo se obtiene el mayor valor añadido debido a su gran dureza y alto coeficiente de pulimento acelerado, sino que el riesgo de desperfectos por expansión se reduce sensiblemente. Su empleo en capas de rodadura conlleva un aumento de la resistencia al deslizamiento ⁽¹²⁾.

El proceso de dosificación en laboratorios de las mezclas bituminosas con escorias, así como su fabricación y puesta en obra, es análogo al de las mezclas convencionales. No obstante, se pueden resaltar varios aspectos que las diferencian:

- Las mezclas bituminosas fabricadas con estos áridos han demostrado que su adhesividad al ligante es buena (superior al obtenido generalmente con áridos silíceos), el coeficiente de resistencia al deslizamiento se conserva mejor que en otros áridos y la resistencia mecánica de las mezclas es superior a la obtenida con los áridos silíceos de referencia.
- El elevado peso específico de las partículas hace que la incidencia del tráfico en la unidad terminada sea mayor que en las mezclas convencionales. Este problema, así como una cierta dificultad de compactación, puede reducirse en gran parte utilizando únicamente una porción de árido de acería en la granulometría final, especialmente los áridos más gruesos que son los que más contribuyen a dotar de esqueleto mineral a la mezcla y proporcionan microtextura para la mejora de la resistencia al deslizamiento en capas de rodadura.
- Debido al elevado peso específico de la escoria de acería, hay que adoptar precauciones a la hora de dosificar el porcentaje de betún en las mezclas, siendo recomendable, para poder comparar dosificaciones, referirlas a porcentaje sobre volumen de áridos.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

- La mayor porosidad de las escorias respecto a los áridos convencionales hace que para conseguir unos contenidos adecuados de huecos en mezcla se deba ir a una dosificación superior de ligante que en la mezcla de referencia. La estructura porosa de la escoria podría absorber el ligante bituminoso con lo que disminuiría la deformación permanente de las mezclas asfálticas a altas temperaturas⁽⁷⁾.
- Se ha observado que retienen considerablemente más el calor que los áridos convencionales. Esta característica puede ser ventajosa en trabajos de reparación con mezclas bituminosas en caliente en clima frío⁽⁹⁾. Esta característica permite un mayor tiempo de transporte de la mezcla⁽⁷⁾.

Aunque en los distintos países hay una amplia gama de planteamientos en relación con la necesidad, o no, de que la escoria que se utilice como árido en mezcla bituminosa esté envejecida, la experiencia habida en nuestro país señala su conveniencia, de acuerdo con lo indicado en el apartado 3.3.

3.4.2.1.- Comportamiento medioambiental de una plataforma experimental de carretera con escoria de acería LD⁽⁸⁾

En Francia se llevó a cabo un estudio en 2008, dentro del programa de investigación ECLAIR, a fin de desarrollar un modelo de comportamiento medioambiental de una escoria de acería LD en una plataforma experimental de carretera no pavimentada y sin tráfico. La escoria empleada se envejeció durante tres años.

La mezcla constó de tres fracciones granulométricas de 0-2 mm, 2-4 mm y 4-6 mm en las mismas proporciones. Debido a que la compactación superficial fue heterogénea aparecieron dos tipos diferentes de superficie: una con material grueso y otra con material más fino. La parte inferior de la estructura se equipó con un sistema de drenaje para recoger el agua de lluvia infiltrada.

La caracterización química de la escoria empleada tenía un alto contenido de calcio (40,7% como CaO), hierro (29,8% como Fe₂O₃) y silicio (16% como SiO₂).

Durante un año se hizo un seguimiento de la emisión potencial y el impacto de elementos traza metálica contaminante, especialmente Cr, V y Ba, presentes en las fases minerales de la escoria, y movilizados durante la infiltración de agua a través de la estructura, del que se destacan los siguientes resultados:

- La concentración de cal libre, aún después de 3 años de envejecimiento, fue de aproximadamente el 6%. La evaluación del potencial de hinchamiento de la escoria (ensayo de expansión steam test) mostró un aumento de volumen de hasta el 20%.

- La diferente permeabilidad entre el material grueso y el más fino con el tiempo tendió a disminuir, volviéndose más homogéneo; esto puede ser debido a la reacción de los minerales de la escoria con el agua y el CO₂ atmosférico que induce a la carbonatación y precipitación. Las curvas de conductividad hidráulica obtenidas de la escoria se asemejarían a las de una marga arenosa.

- Excepto en el caso del Ba, las concentraciones de los elementos traza Cr y V han resultado generalmente bajas en aguas de filtración y en los resultados de los ensayos de lixiviados. Estos metales se localizan en fases minerales ferrosas bastante estables, en cambio el V se asocia a silicatos más reactivos. El pH es muy alcalino (> 12).

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

- El estudio ecotoxicológico realizado con lombrices de tierra no reveló ningún efecto de toxicidad en las aguas de filtración respecto al hábitat.

3.4.3.- Fabricación de hormigón ⁽³⁾

Otra aplicación en la que pueden estar presentes en forma de árido es en la industria del hormigón. Esto conlleva el empleo de un menor porcentaje de árido natural en construcciones de obras públicas. En ingeniería de puertos, se han empleado escorias de acerías LD, depositadas durante cuatro años, como árido para la fabricación de bloques de hormigón. Las pruebas realizadas en probetas dieron lugar a un ahorro del 10% de cemento debido a la alta densidad de la escoria. También se han empleado en la fabricación de espaldones de hormigón en masa, previamente se caracterizaron los acopios mediante ensayos y análisis químicos (contenido en sulfatos, sulfuros, cloruros, cal libre, etc), análisis mineralógico y petrográfico, reactividades, etc.

3.4.4.- Obras de ferrocarril

Las escorias LD una vez procesadas en planta (machaqueo, separación del hierro, selección por tamaños y reducción de la cal libre), para obtener el tamaño adecuado junto con otras especificaciones del balasto, serían aptas para su empleo como balasto.

En Brasil a principios de los años 90, ArcelorMittal Tubarao (AMT) en asociación con un operador de ferrocarril llevaron a cabo los primeros ensayos para usar las escorias LD como balasto; a raíz de estos ensayos se elaboraron especificaciones técnicas de utilización de este balasto, y a finales de los 90 se emplearon como balasto de forma regular (las principales propiedades de la escoria se muestran en la tabla 6) hasta 2006, año el que se empezaron a detectar problemas relacionados con el tamaño de partícula y errores en la señal debidos a la conductividad eléctrica de la escoria. En 2007 el operador optó por dejar de emplear las escorias LD como balasto para estudiar en profundidad estos problemas. En total, en ese periodo se emplearon cerca de 1 Mt de escorias que habían estado almacenadas durante dos años.

PROPIEDADES FÍSICAS	Especificaciones Técnicas	Resultados Escoria Acería LD
Partículas desmenuzables	< 5 %	3 %
Material pulverulento	< 1 %	0,5
Terrones de arcilla	< 0,5 %	no
Resistencia al desgaste de los Ángeles	< 40 %	15 %
Peso (kg) por metro cúbico	1.400 kg/m ³	2.800 kg/m ³

Tabla 6 : Especificaciones técnicas bajo contrato de la escoria de acería LD

Los principales problemas detectados fueron: problemas de drenaje de la vía y efecto hormigón en el balasto, debido al fenómeno de expansión que genera esfuerzos internos causando daños en la estructura y generando finos (partículas desmenuzables de 11% a 1%); fuga de

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

corriente eléctrica y error en la detección de la señal debido a la presencia de elemento metálicos.

Para solucionar el problema se llevó a cabo un proyecto de investigación con la participación de ArcelorMittal con el fin de encontrar un método de curado de la escoria con el que se disminuyera el contenido en CaO (max 3%) y permitiera su empleo como balasto. Para ello se siguieron las siguientes pautas:

- Se construyó un simulador de vía férrea en el que se instaló un equipo de medida para chequear la resistencia eléctrica, además de un pluviómetro. Se comprobó que las principales fugas de corriente aparecen tras periodos de lluvia, incrementándose por el mal sistema de drenaje debido a los finos de la escoria.
- Se estudió en laboratorio el efecto sufrido por la escoria sumergida en agua, observándose que tras once ciclos de agua el pH del agua disminuyó de 12 a 10, también disminuyeron el contenido de CaO por disolución y la conductividad eléctrica, por otro lado la resistencia eléctrica aumentó.
- También se estudiaron (midiendo temperatura, humedad, precipitaciones y valor de CO₂) tres formas distintas de almacenar la escoria: extendida (30 cm de alto), en forma de cono (2 m de alto) y, de forma habitual (4 m de alto). Los resultados obtenidos con distintos periodos de tiempo se expresan en la tabla 7.

	Capacidad (16 m²)	CaO T0	CaO T45	CaO T60
Extendida	8 toneladas	8,03	2,8	1,5
Forma de cono	25 toneladas	8,03	3,11	1,7
Forma habitual	50 toneladas	8,03	Sensor de base no húmedo	Sensor de base no húmedo

Tabla 7: Resultados obtenidos en las distintas disposiciones de curado

Tras el tratamiento de curado de las escorias para el balasto, se tamizaron y se rechazó el 25% (tamaño de partícula < 32 mm), quedando resuelto tanto el problema del tamaño de los finos como el de la baja resistividad eléctrica; posteriormente se ensayaron sus propiedades físicas. El material fino rechazado se puede emplear en carreteras por su baja expansividad y alta demanda. En la tabla 8 se pueden comparar algunas de las propiedades antes del tratamiento con las resultantes tras el curado de 60 días de la escoria almacenada en forma de cono.

PROPIEDADES FÍSICAS	T 0	T 60
Tamaño máx de partícula	75 mm	75 mm
Resistencia al desgaste de los Ángeles	11,5%	11,43%
Absorción de agua	1,74%	0,81%
Porosidad	4,21%	2,03%
Partículas desmenuzables	11,51%	0%

Tabla 8: Resultados obtenidos en los distintos métodos de curado

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

La principal ventaja de emplear escoria de acería LD como balasto frente al balasto natural radica en el módulo de elasticidad, siendo de 66 MPa en la escoria frente a 33,11 MPa en los áridos naturales. La sección típica del balasto tiene un espesor de 40 cm que puede reducirse en torno a un 25% si se emplea escoria de acería LD tratada lo que disminuye el coste económico. Se está realizando un estudio cuyos primeros resultados indican, que el ciclo de vida del balasto puede aumentar hasta un 40% usando balasto de escoria de acería LD⁽²⁰⁾.

3.4.5.- Fabricación de clinker⁽¹⁰⁾

Debido a la composición química de la escoria de acería, con altos contenidos de calcio y alúmina, se pueden emplear en la fabricación del clinker. El mayor problema de esta aplicación es que el hierro metálico presente en la escoria puede dañar las paredes del refractario del horno rotatorio.

3.4.6.- Uso interno⁽¹⁰⁾

Se pueden plantear otras alternativas de valorización de las escorias LD dándolas un uso interno en el proceso del afino del acero, como son:

- La reutilización en la instalación del Sinter ya que aporta hierro, lo que lleva consigo un ahorro de mineral de hierro y de cal necesarios en el proceso.
- Como sustituto del espato (convertidor como fundente 19/50), junto a la cal y dolomia, en el baño metálico para formar la propia escoria.
- Como fluidizante en el convertidor con objeto de mantener el baño de acero en estado líquido, el lado negativo es que se devuelven las impurezas al convertidor.

3.4.7.- Otros usos

- Para la fabricación de ladrillos refractarios, se emplea la escoria como materia prima al sustituir a la arena. Presenta como único problema el contenido en cal que puede generar eflorescencias⁽¹⁰⁾.
- Actualmente también se está empleando en la consolidación de residuos, para cubrir y sellar vertederos de RSU o como relleno de antiguas minas⁽³⁾.
- En la construcción de lechos de filtración para el postratamiento de efluentes domésticos y sanitarios, estudios realizados en la Universidad Federal de Brasil han mostrado buenos resultados⁽²⁰⁾.
- En la construcción de gabiones para la protección de taludes y, de muros o barreras antirruído⁽¹⁰⁾.
- En la fabricación de estructuras para la fabricación de arrecifes artificiales⁽²⁰⁾.

3.4.9.- Aplicaciones contempladas en proyectos de investigación

En cuanto a la búsqueda de posibles usos y aprovechamiento en España, el proyecto I+D ZERORES “Análisis, desarrollo e implementación de soluciones ecoeficientes para la valorización de residuos”, en el que participa ArcelorMittal, incluyó como una de las líneas

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

estratégicas de trabajo, la reducción de residuos y materiales no ferrícos a vertedero, principalmente escorias de acería LD. La escoria tiene un uso como materia prima: como árido para hormigón en masa, en la fabricación de cemento, de lana de roca, etc ^(3, 6).

En Brasil, ArcelorMittal produce anualmente alrededor de 800.000 t de escorias de acería LD. Para desarrollar métodos correctos de aplicación ha estudiado los factores que aceleran la estabilización de la escoria, de modo que los óxidos libres de CaO y MgO sean parcialmente inertizados, reduciendo así la capacidad de hinchamiento de la escoria. Ha registrado dos productos para proyectos de carretera: Revsol™ y Acerita™. Revsol es una escoria LD con una expansión mayor del 3% (PTM 130, Pennsylvania Testing Method, USA), se puede emplear en carreteras no pavimentadas y vertederos. Acerita es una escoria tratada, tiene una expansión menor del 3% (PTM 130), se puede emplear en capas de base y subbase de firmes mezclada o no con otros materiales. Presenta una resistencia al desgaste de los Ángeles del 20% y un CBR mayor que el del árido natural, al dotar de mayor capacidad de soporte y tener mayor módulo de elasticidad, permite una reducción del espesor de las capas. Otra ventaja es que se puede mezclar con otros materiales, como arcilla, sin comprometer la estructura del firme lo que disminuye el coste económico ^(21, 22).

Cada año en Suecia se almacenan alrededor de 200.000 t de escorias. En este país se ha desarrollado, dentro del trabajo de investigación ViLD (vanadium in LD slag), una nueva tecnología mediante la cual las escorias pueden ser recicladas y se puede recuperar el vanadio para usarlo en nuevos productos. Con este método se obtiene un producto rico en V que se emplea en la industria del acero, mientras que los restos de productos calcáreos de las escorias se emplean como materia prima en la industria del cemento y de la construcción ⁽²³⁾.

3.5.- OBRAS REALIZADAS

La escoria de acería LD, molida y clasificada, se ha utilizado como árido para mezclas bituminosas en numerosos tramos de todo tipo de carreteras en Asturias. A continuación, se citan como ejemplo algunas de ellas:

- Autopista del Huerna,
- Carretera Candás-Tabaza (AS-110),
- Grado-Avilés (AS-237),
- Cancienes-Llanera (AS-17).

El escombros de acería LD se ha utilizado como relleno en algunos tramos de carreteras en Asturias, como por ejemplo:

- Cueto-Matalblima,
- Moreda-Puerto del Musel,
- Riaño-Olloniego.

En Brasil, las escorias de acería LD generadas se han empleado en: carreteras en capas base y subbase de 20 cm (90% de acerita y 10% de arcilla) y en el refuerzo de la capa base; en la construcción de una terminal industrial multimodal; en la construcción de la pista de aterrizaje del aeropuerto Vitória; en la fabricación de piezas de hormigón para infraestructuras de carreteras. Más recientemente, se han fabricado tetrápodos con los que se han construido arrecifes artificiales emplazados bajo el mar para la protección de la costa ⁽²⁴⁾.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

Generalidades

La Directiva Marco de Residuos, 2008/98/CE, establece el marco jurídico de la Unión Europea para la gestión de los residuos.

En España, la transposición de esta Directiva al ordenamiento jurídico interno se ha llevado a cabo a través de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados que sustituye a la anteriormente vigente Ley 10/1998, de Residuos.

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 establecida en la decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las escorias LD pueden ser sometidas a distintos tratamientos para ser acondicionadas a los requerimientos de los posibles usos o necesidades internas, como son, por ejemplo, enfriamiento y recuperación magnética u otros tratamientos adicionales como clasificación, molienda y cribado para alcanzar las granulometrías necesarias para cada uso.

Las escorias LD que son sometidas a los tratamientos de enfriamiento y recuperación magnética, pero que no se reciclan internamente en las instalaciones productoras o no se procede a su comercialización, tienen la consideración de "Residuos del tratamiento de escorias" y están caracterizados como residuos no peligrosos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" en el subapartado 10 02 correspondiente a "Residuos de la industria del hierro y del acero", con el código 10 02 01.

Ventajas

- Las escorias de acerías LD están compuestas principalmente por Ca, Si, Fe, Mg y Mn junto con cantidades menores de otros elementos. No están presentes en las escorias producidas en España cantidades representativas de elementos considerados como nocivos en las legislaciones ambientales, como el arsénico, el cadmio, el cobalto y el mercurio.
- En España existe una amplia experiencia en la utilización de la escoria de acería LD como corrector de suelos de cultivos. La escoria no solo es capaz de aportar una serie de micronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas sino que también mejora la densidad, porosidad y permeabilidad de los suelos.
- El aprovechamiento de las escorias LD, produce un ahorro importante de otros recursos naturales que serían necesarios para las distintas aplicaciones a las cuales se destina.
- La escorias es producida simultáneamente con el acero y, permitir su aprovechamiento evita la gestión de las mismas por otro medio, como por ejemplo, destino vertedero.
- Por cada tonelada de escoria LD que se reutiliza en la fabricación de hormigón permite ahorrar hasta 750 kg de emisión de CO₂ a la industria del cemento⁽²¹⁾.

Inconvenientes

- Los lixiviados de las escorias de acerías pueden llegar a tener un pH superior a 11. No obstante, si se usa en áreas en contacto con aguas de flujo lento o estancado, se debe

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

airear el agua para evitar que pueda afectar a la fauna y la flora. En otros casos, no se ve afectado por su uso.

- Desde el punto de vista ecotoxicológico, generalmente el lixiviado de metales de las escorias LD no representa una preocupación, sin embargo, el lixiviado de bario (Ba) podría en algunos casos llegar a serlo, lo mismo que el lixiviado de oxianiones tales como cromo (Cr), vanadio (V) y boro (B)⁽⁹⁾.
- En la bibliografía técnica se ha encontrado algún caso de obstrucción de tuberías del sistema de drenaje del firme, al precipitarse el carbonato cálcico procedente de la combinación de los lixiviados de la escoria con el dióxido de carbono del aire.
- Las escorias de acería, como las producidas en el procedimiento basado en el empleo de oxígeno tienen cal libre (CaO) y magnesia (MgO), estos óxidos pueden reaccionar con el agua y formar hidróxidos en una reacción expansiva. La expansividad hidráulica de las escorias de acería es más frecuente que la que puede producirse en las escorias de alto horno por la presencia de sulfatos solubles. La primera expansión en el tiempo corresponde a la hidratación de la cal y tiene lugar en el plazo de semanas, mientras que la hidratación del óxido de magnesio se efectúa a más largo plazo, y después de la anterior. Para reducir el riesgo de expansión de las escorias de acería, en EE.UU. se recomienda una maduración o envejecimiento de entre 3 y 12 meses. A este respecto conviene señalar que, en España, la práctica habitual con las escorias 5/10 y 10/20 es regar con agua y dejar madurar de 3 a 6 meses.

5.- NORMATIVA TÉCNICA

- Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualiza el artículo 510 Ahorros del PG-3.
- UNE-EN 13383-1/AC:2004 Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13383-1:2003 Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13383-2:2003 Escollera. Parte 2: Métodos de ensayo.
- UNE-EN 13242:2003 + A1:2008 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE-EN 12620:2003+ A1:2009 Áridos para hormigón
- UNE-EN 933-8:2012+A1:2015 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- UNE-EN 13043/AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.
- EN 1744-4:2007 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 4: Determinación de la sensibilidad al agua de los polvos minerales para mezclas bituminosas.
- UNE-EN 1744-1:2010 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.
- UNE-EN 13450/AC:2004 Áridos para balasto.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

- UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas
- EN 1744-4:2007 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 4:
- Determinación de la sensibilidad al agua de los materiales de relleno para mezclas bituminosas UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.
- UNE-EN 13450/AC:2004 Áridos para balasto. Será anulada por: PNE-prEN 13450
- UNE-EN 12457-(1,2,3 y 4):2003. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.
- NLT-326/00. Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (Método del tanque).
- Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière. SETRA. 2011
- NLT – 361/91. “Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería”.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículos 510 y 542

6.- REFERENCIAS

- [1] SHI, CAIJUN, “Steel Slag- Its Production, Processing, Characteristics and cementitious properties”, Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 230-235, May-June 2004.
- [2] LÓPEZ F. A.; MEDINA F. “Escorias LD: co-productos de la industria siderúrgica”, C y E. 1989.
- [3] DEL OLMO ROALES, A. ArceloMittal Asturias. “Desarrollo Sostenible en la utilización de materias primas”. V Jornadas Quinta la Vega "Las Industrias Siderúrgicas, Energéticas y Cementeras. El aprovisionamiento. 2008
- [4] <http://www.unesid.org/documentos/revista/2011/index.html>
- [5] OLIVER SANJUAN, S. UNESID. “Reach en la siderurgia. Caso concreto: agregados secundarios en REACH. Ejemplo de las escorias siderúrgicas”. Bilbao, 2011
- [6] <http://www.euroslag.org/products/statistics/2010/>
- [7] HUANG, L.S.; LIN, D.F. “Influence of cooling efficiency of basic oxygen furnace slag in recycled asphalt mixtures”. International Journal of Pavement Research and Technology, vol 4, nº 6, pp. 347-355. 2011.
- [8] LEGRET, M.; CHAURAND, P.; BÉNARD, A.; CAPOWIEZ, Y.; DENELEE, D.; REYNARD, J.; LASSABATERE, L.; YILMAZ, D; ROSE, J.; DOMAS, J; BÉCHET, B.; RICHARD, D.; BOTTERO, J.Y. “Environmental assessment of a BOF steel slag used in road construction: The ECLAIR research program”. Environnement and Technique, nº 57, pp. 14-19, marzo, 2010.
- [9] Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme. “Methology for assessing alternative materials for road construction”. Sustainable and Advanced Materilas for Roads Construction (SAMARIS), 145p. 2005.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

- [10] ANDRÉS VIZÁN, S.; HUERTA MARTÍNEZ, G.; LLERA TRAVIESA, R.; LUIÑA FERNÁNDEZ, R. Universidad de Oviedo. “Valoración tecno-ambiental de las escorias de acería LD mediante análisis de ciclo de vida”. XIV Internacional Congreso on Project Engineering, pp. 1307-1323. Madrid, 2010.
- [11] RUIZ RUBIO A.; GARCÍA CARRETERO J. “La aplicación de las escorias de acería en carreteras”, Ingeniería Civil, CEDEX, Núm. 80, pp .5-9. 1991.
- [12] EUROSLAG; EUROFER. “Position paper on the status of ferrous slag complying with the Waste Framework Directive (Articles 5/6) and the REACH Regulation”. Abril 2012.
- [13] EMERY, J.J.”Slag Utilization in Pavement Construction” in ASMT Special Technical Publication 774: “Extending Aggregate Resources”. Washington, DC, 1982.
- [14] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). “User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction”. 1997.
- [15] OZEKI, S. “Properties and usage of steel plant slag”, ENCOSTEEL- Steel for Sustainable Development-135. Stockholm, June, 1997.
- [16] PIRET, J. “Valorisation de la scorie LD. Aspects généraux du probleme et réalisation dans le domaine de la constrution routière”, Revue de Metallurgie nº 75, pp. 331-338. 1978.
- [17] PIRET, J.; LESGARDEUR A. “Route experimental en scorie LD”, Excavator nº 444-1. 1981.
- [18] PIRET, J.; WILLEMIJNS K.; CLAVERT J.; GESTMANS A. “Les propietés antidérapants de la scorie LD. Essais de laboratoire et réalisation pratique”. Day on Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slags CEC. Liege, 1988.
- [19] THOMAS G.H. “Expériences Britanniques d'utilisation des scories LD comme revêtement routier”, Revue de la Métallurgie, pp. 329-334. Mai, 1978.
- [20] MOREIRA, R.F.T. ; BICUDO FILHO, P.S. “BOF Slag use as ballast, ArcelorMittal Tubarão Experience”. Noviembre, 2010
- [21] <http://www.arcelormittal.com/corp/corporate-responsibility/environment/energy-water-waste/recycling-case-study>
- [22] http://www.cst.com.br/english/products/co_products/catalog_products/acerita/acerita.asp
- [23] DEL HOYO, F. “Ruukki participa en un proyecto de I+D en Suecia para reciclar el vanadio de las acerías”. <http://www.canteras.es/es/node/935>, enero, 2012
- [24] http://www.cst.com.br/english/products/co_products/aplications/road_construction/road_1.asp
- [25] VERHASSELT A.; CHOQUET F. “Steel slags as unbound aggregate in road construction; Problems and recommendations” in “Unbound Aggregates in Roads”, ed. Jones and Dawson, pp. 204 –209. Butterworths, London, 1989.
- [26] IHOBE S.A, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. 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.
- [27] OCDE. “Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière”. París, 1977.
- [28] ITGME. “Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica”. Madrid, 1995.

FICHA TÉCNICA	CLAVE:	Mes: DICIEMBRE Año: 2012
ESCORIAS DE ACERÍA LD		

7.- ENTIDADES DE CONTACTO

- ArcelorMittal ASTURIAS (Avilés)

Lugar Trasona 90
33400 Avilés
SPAIN
Phone: +34 985 12 60 00
E-mail: comunicaespana@arcelormittal.com
<http://www.arcelormittal.com/>
- ArcelorMittal ASTURIAS (Gijon)

Verina de Abajo 570
33200 Gijon
SPAIN
Phone: +34 985 18 70 00
E-mail: comunicaespana@arcelormittal.com
<http://www.arcelormittal.com/>
- EDERSA (Escorias y Derivados S.A)

Carretera de Avilés al Faro de Peñas, km 1,5
Parque de Lobos – Avilés
Apartado de Correos nº 447
33400 Avilés (Asturias)
Tel. 985 540992 – 985 547819
edersa@edersa.es
<http://www.edersa.es>
- UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas)

c/ Castelló, 128 – 3º
28006 Madrid
Tel. 91 5624010
unesid@unesid.org
<http://www.unesid.org>