



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Aprovechamiento de subproductos industriales en la
fabricación de mezclas bituminosas**

Autor: Marcos Cano Bertiz

Tutor: Francisco de Asís Ortega Fernández

Oviedo, Julio de 2018



Resumen/Abstract

Resumen

Las escorias siderúrgicas son uno de los subproductos industriales producidos a mayor escala. Este tipo de subproductos se emplean, si es posible, como materiales de rellenos en obras u otras aplicaciones como sustituto al agregado natural.

Ya que en el proceso siderúrgico se producen diversos tipos de escorias, no todas ellas poseen las mismas aplicaciones ya que existe cierta variabilidad química entre ellas. Un ejemplo claro de esta disparidad se da por ejemplo en las escorias de Horno Alto frente a las escorias producidas en la Acería-LD. Mientras que las escorias de Horno Alto presentan estabilidad volumétrica, las escorias de acería debido a la presencia principalmente de cal libre, en presencia de agua tienden a sufrir un proceso de hinchamiento.

En este documento se ha realizado un estudio detallado de las características de las escorias generadas en la acería LD, con el fin de determinar su posible aplicación en mezclas tipo hormigón bituminoso, comúnmente denominadas mezclas bituminosas o asfaltos.

Se ha realizado tanto una búsqueda bibliográfica como ensayos de laboratorio, con el fin de determinar si la escoria cumple las características técnicas necesarias para ser aplicadas en mezclas bituminosas según la normativa española. Los resultados obtenidos han sido positivos llegando incluso a establecer que las escorias de acería podrían ser usadas en las aplicaciones con los requerimientos técnicos más restrictivos.

Además, se ha analizado la posible incorporación de este tipo de material en las carreteras del Principado de Asturias. Para ello se han estudiado sustituciones parciales del árido común (escenarios más factibles) de entre un 15 a un 50%. Teniendo en cuenta esto, se han establecido tasas anuales muy reseñables de consumo de este árido, yendo de 34 600 toneladas al año en el peor de los casos, hasta 376 000 toneladas de escorias al año en el mejor de ellos.



Abstract:

Iron and steelmaking slags are one the most produced by-products globally. These by-products are commonly used, if possible, as filling materials in construction or other applications whom require natural aggregates.

In the iron and steelmaking process, different types of slags are produced. Not all the slags have the same characteristics because their chemical composition depend on the stage where they are produced. An example of this is shown regarding Blast Furnace (BF) and Basic Oxygen Furnace (BOF) slags. While the Blast Furnace slags present acceptable volumetric stability, Basic Oxygen Furnace slags, due to the presence of free lime, present swelling behaviors.

In this document, a detailed studied of the BOF slags characteristics has been made for the application in asphalt mixtures.

Bibliographic research and laboratory test have been carried out to determine if the BOF slags meet the technical requirements of the Spanish standards for bituminous mixtures. The obtained results have been very positive, showing that the BOF slags can be used even in the most technically-demanding applications.

Finally, a market study has been developed to introduce this kind of material in the Asturian market. A partial substitution of the slags (feasible scenario) ranging between 15 to 50% of substitution have been made. Assuming this, remarkable consumption rates of BOF slags were achieved, starting from about 34 600 t/year in the worst of the scenarios to 376 000 t/year in the best of the scenarios.



Agradecimientos

“Este Trabajo Fin de Máster ha sido posible gracias al apoyo de muchas personas permitiéndome llegar a este momento. En primer lugar, agradeceré a toda mi familia por el apoyo recibido en todo momento.

En segundo lugar, pero no por ello menos importante, a los chicos y chicas del Área de Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Oviedo ya que gracias a ellos he podido formarme y evolucionar en todos los ámbitos de mi vida.

En especial agradecer a mi tutor del trabajo Francisco de Asís Ortega Fernández por toda la ayuda recibida a lo largo de estos últimos años y Aitana Díaz Suarez por la ayuda recibida en la realización de este trabajo.”



Contenido

1	Introducción	12
2	Objeto	14
3	Subproductos generados en el proceso siderúrgico	15
3.1	Subproductos en la siderurgia integral.....	16
3.1.1	Sínter.....	16
3.1.2	Baterías de coque.....	17
3.1.3	Horno alto.....	18
3.1.4	Proceso de acería.....	19
3.1.5	Procesos de laminación y acabado:.....	20
3.2	Subproductos en la siderurgia eléctrica.	21
3.2.1	Horno de arco eléctrico	21
3.2.2	Procesos de laminación y acabado.....	22
4	Proceso y características de las escorias de acería	27
4.1	Generación.....	27
4.1.1	Tratamiento de desulfuración del arrabio.	27
4.1.2	Proceso de convertidor	28
4.1.3	Proceso de metalurgia secundaria	30
5	Características de las escorias de acería	33
5.1	Composición química.....	33
5.2	Propiedades físicas.....	35
6	Acciones para la mejora de las propiedades de la escoria.....	37
7	Aplicaciones actuales de las escorias de acería.	40
8	Mezclas bituminosas en carreteras.....	44
8.1	Categoría de tráfico	45
8.2	Dimensionamiento de la explanada	45
8.3	Dimensionado del firme	46
8.4	Materiales para el firme	47
8.5	Mezclas bituminosas en caliente.....	48
9	Normativa para la aplicación de mezclas bituminosas.	56



10	Empleo de escorias siderúrgicas en mezclas bituminosas	58
10.1	Angulosidad (porcentaje de caras de fractura)	59
10.2	Forma (índice de lajas).....	60
10.3	Resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles).....	62
10.4	Resistencia al pulimento para capas de rodadura (coeficiente de pulimento acelerado).....	63
10.5	Limpieza (contenido de impurezas).....	64
10.6	Expansividad	65
10.7	Densidad	66
10.8	Dureza de las partículas.....	67
10.9	Humedad.....	68
10.10	Cloruros solubles en agua y conductividad	68
10.11	Comparativa con otros agregados empleados	70
11	Mercado potencial de las escorias de acería en España	72
11.1	Rango de comercialización	72
11.2	Tendencia en la construcción de nuevos de viales.....	73
11.3	Tendencia de renovación de pavimentos en vías construidas.....	74
11.4	Requerimiento de escorias en mezclas bituminosas.....	77
11.4.1	Volumen a construir	78
11.4.2	Requerimiento de escoria	79
11.5	Mercado potencial.....	87
12	Siguientes pasos	89
13	Conclusiones.....	93
14	Bibliografía.....	95
15	Anexos	100



Índice de tablas

Tabla 1: Generación de subproductos- AAI ArcelorMittal Asturias 2006 ⁸	23
Tabla 2: Algunos residuos principales generados en las instalaciones de ArcelorMittal Asturias ⁸	23
Tabla 3: Ejemplo de dos composiciones químicas de escorias BOF	33
Tabla 4: Ejemplo de composición química de escorias de metalurgia secundaria.	34
Tabla 5: Ejemplos de composición química de escorias de desulfuración	34
Tabla 6: Composición genérica de escorias de acería ²¹	35
Tabla 7: Características físicas de las escorias de acería (CEDEX, 2012) ²²	36
Tabla 8: Categorías de tráfico según el número de vehículos pesados al día	45
Tabla 9: Tipos de ligantes hidrocarbonados a emplear en capas de rodadura e intermedia	50
Tabla 10: Tipos de ligantes hidrocarbonados a emplear en capas base	50
Tabla 11: Proporción de polvo mineral de aportación	51
Tabla 12: Granulometría del polvo mineral	52
Tabla 13: Husos granulométricos de las mezclas bituminosas	53
Tabla 14: Espesor de las capas de firme según su mezcla bituminosa	54
Tabla 15: Dotación mínima de ligante en mezclas bituminosas	54
Tabla 16: Relación ponderal polvo mineral-ligante	55
Tabla 17 : Normativa aplicable a ensayos de mezclas bituminosas	56



Tabla 18: Límites de partículas parcialmente trituradas en áridos	59
Tabla 19: Límites de partículas parcialmente trituradas en áridos	60
Tabla 20: Límites en el índice de lajas para áridos	61
Tabla 21: Límites de coeficiente de Los Angeles para áridos en mezclas bituminosas	63
Tabla 22: Límites de coeficiente de pulimiento acelerado en áridos de mezclas bituminosas	64
Tabla 23: Resultado ensayo de dureza	67
Tabla 24: Tabla de valores Mohs	67
Tabla 25: Humedad de la escoria de acería.....	68
Tabla 26: Determinación de cloruros solubles en agua	69
Tabla 27: Conductividad eléctrica en escorias de acería.....	70
Tabla 28: Comparación de escorias de acería BOF con un agregado granítico	70
Tabla 29: Comparativa de escorias de acería con otros agregados naturales ⁴¹	71
Tabla 30: Evolución de los kilómetros totales de carreteras	73
Tabla 31: Licitaciones de renovación de pavimentos años 2017-2015.....	75
Tabla 32: Kilómetros renovados en Asturias en los últimos 3 años.....	77
Tabla 33: Densidades de mezcla de áridos.....	81
Tabla 34: Composición de la mezcla bituminosa (%vol.) para capas de rodadura	81
Tabla 35: Porcentajes de áridos en volumen respecto al total de la mezcla	82
Tabla 36: Requerimientos de escoria en capas de rodadura	82



Tabla 37: Composición (% vol.) de las mezclas bituminosas en capas intermedias	83
Tabla 38: % en volumen de áridos respecto a la mezcla total en capas intermedias.....	84
Tabla 39: Requerimientos de escorias calculados para capas intermedias.....	84
Tabla 40: Composición total mezcla bituminosa en capa base.....	85
Tabla 41: Cálculo del porcentaje de los 2 áridos sobre la mezcla total en capas base	85
Tabla 42: Escoria requerida en capas base según su proporción de mezcla	85
Tabla 43: Mercado potencial para una sustitución del 15% de áridos por escorias.....	87
Tabla 44: Mercado potencial para una sustitución del 25% de áridos por escorias.....	88
Tabla 45: Mercado potencial para una sustitución del 30% de áridos por escorias.....	88
Tabla 46: Costes asociados a la construcción de un vial piloto.....	89
Tabla 47: Costes asociados a los ensayos del árido en pruebas piloto	90
Tabla 48: Costes asociados a ensayos sobre la mezcla bituminosa en caliente en ensayo piloto.....	91
Tabla 49: Costes asociados a las probetas terminadas en los ensayos piloto	92
Tabla 50: Resumen -costes de ensayos	92



Índice de figuras

Figura 1: Esquema del proceso siderúrgico integral (fuente propia).....	15
Figura 2: Esquema simplificado del proceso siderúrgico eléctrico (fuente propia).....	15
Figura 3: Proceso de sinterización del mineral (ArcelorMittal Gante). FUENTE: https://belgium.arcelormittal.com/en/work-environment/sinter-plant/	16
Figura 4: Proceso de deshornado del coque FUENTE: http://www.scmholding.com/en/media-centre/library/foto/15/	17
Figura 5: Sangrado del horno alto – piquera FUENTE: http://www.aleastur.com/en/siderurgia-en/blast-furnace-runners/	18
Figura 6: Carga de arrabio en el convertidor FUENTE: https://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/new-x-meltr-converter-shop-at-iisco-steel-plant-successfully-commissioned-568/	19
Figura 7: Proceso de descascarillado de la banda FUENTE: https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2010/industry_solutions/iis201011811.htm&content[]=IS&content[]=ISD&content[]=IMT&content[]=PDMT	20
Figura 8: Volcado de acero líquido del horno eléctrico. FUENTE: http://www.electrothermindia.com/iron-steel-making-machines.html	22
Figura 9: Esquema básico de los principales subproductos de la siderurgia (fuente propia)	26
Figura 10: Proceso de skimming de la escoria de desulfuración FUENTE: http://www.kuettner.com/Default.aspx?ID=545	27
Figura 11: Diagrama del proceso de desulfuración FUENTE: https://aceroplatea.es/docs/documento157.pdf	28
Figura 12: Etapas en el proceso de convertidor FUENTE: https://www.steelconstruction.info/Steel_manufacture	30
Figura 13: Volcado de escoria en cuchara FUENTE: http://mapio.net/pic/p-24952401/	30



Figura 14: Proceso de trituración de las escorias solidificadas. FUENTE: <http://fractum.com/industries/steel-industries/slag-pot-deskulling/> 32

Figura 15: Volcado de escorias en foso (izquierda) y regado de escorias con agua (derecha) FUENTES: <http://buildindustrialpakistan.blogspot.com/2014/03/ld-converter-slag-disposal-facilities.html> y <https://www.hennlich-engineering.com/applications/fog-cannons/steel-slag.html> 32

Figura 16: Stock de escorias BOF a la intemperie FUENTE: <http://scrapbook.majesticsteel.com/slag-sustainability/> 37

Figura 17: Proceso de estabilización por vapor en Kokura Works desarrollado en 1992.... 38

Figura 18: Instalaciones de envejecimiento a presión de Nippon Steel y Sumitomo Metal²³ 38

Figura 19: Lanza de inyección de sílice (CSC) FUENTE: <http://www.csc.com.tw/csc/ts/ena/pdf/no28/09.PDF> 39

Figura 20: Aplicaciones de las escorias de horno alto (EUROSLAG)..... 42

Figura 21: Aplicaciones de escorias de acería (EUROSLAG) 42

Figura 22 Capas principales de una carretera FUENTE: izquierda - propia, derecha - <http://www.drASFALTO.com.br/servicos> 44

Figura 23: Aplicación de dos capas diferentes de mezclas asfálticas FUENTE: <http://www.pavementinteractive.org/pavement-typesasphalt-concrete-base-acb/>..... 48

Figura 24: Regiones climáticas de España para la construcción de carreteras 49

Figura 25: Principio de interacción escorias-betún FUENTE: izquierda -propia y derecha: http://www.controls-group.com/eng/asphaltbituminous-mixture-testing-equipment/core-drilling-machine-korbit_.php 58

Figura 26: Detalle de forma de caras en las escorias de acería. 60

Figura 27: Separación del material por tamices de barras..... 61



Figura 28: Detalle de equipamiento para realizar en ensayo de Los Angeles FUENTE: <http://www.pavementinteractive.org/los-angeles-abrasion/>..... 62

Figura 29: Máquina empleada para determinar el CPA FUENTE: <http://www.controls-group.com/eng/aggregates-testing-equipment/accelerated-polishing-machine-psv.php>. 63

Figura 30: Límite de comercialización de la escoria de la acería de Veriña 72

Figura 31: Límite de comercialización de la escoria de acería de Avilés 73

Figura 32: Evolución de los km totales de carreteras 74

Figura 33: Km de pavimento renovados anualmente por la Administración de Asturias ... 77



1 Introducción

Las restricciones medioambientales y penalizaciones económicas obligan cada vez más a optimizar los procesos de reciclaje y valorización interna de los subproductos generados en los diversos procesos industriales, sin olvidar otros factores claves como la huella medioambiental generada en actividades de explotación de recursos naturales.

Todo ello, junto con las exigencias provenientes de la globalización de los mercados, impulsa la creación y actualización de procesos productivos en los que la eficiencia sea máxima y el reaprovechamiento de los subproductos, inevitablemente generados, sea completo, favoreciendo así la economía circular.

Según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, se define el concepto de subproducto como cualquier sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto. La definición de subproducto implica la aplicación de su normativa específica, específicamente el Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH) y el Reglamento (CE) 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP) así como otras normativas específicas que pueden afectar a determinadas sustancias concretas¹.

Todos estos conceptos se conjugan en la llamada economía circular, término que tiene en cuenta la necesidad de considerar los productos comercializados dentro de ciclos cerrados que no tengan salidas exteriores y retengan el máximo valor posible de los productos y materiales. Es decir, un sistema en el que permita un uso, reacondicionamiento y reciclado óptimo de los productos y materiales².

Siguiendo estos conceptos, resulta esencial favorecer las sinergias entre diferentes industrias y actividades con el fin de promover una red en la que los materiales que no sean



útiles para una actividad en concreto puedan serlo en otros sectores eliminando en su totalidad el concepto de residuo.

En el caso de la industria siderúrgica, se generan cantidades importantes de subproductos dadas las enormes masas de materias primas empleadas, cuyas características podrían ser interesantes en actividades en las que se requiera, por ejemplo, un material con carga férrea elevada o en la síntesis de nuevos materiales.

Las escorias siderúrgicas son los subproductos que, en cuanto a volúmenes de generación, adquieren mayor importancia. La valorización de un tipo de residuo como este impactaría de manera muy significativa tanto en la vida de los vertederos que actualmente se emplean para acumular este tipo de material, así como en el impacto medioambiental ocasionado al explotar el mineral natural que resultaría sustituido por el subproducto.

En el caso de la escoria de horno alto, es tradicional su uso como materia prima para la construcción de las diferentes capas en las carreteras, sustituyendo a los agregados de naturaleza caliza habituales ya que tienen propiedades mecánicas adecuadas, así como abundancia y disponibilidad.

Desafortunadamente, no ocurre lo mismo con la escoria de acería que generalmente se destina mayoritariamente a almacenamiento en vertedero, debido a algunas de sus características, tal como se indicará posteriormente.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, este Trabajo Fin de Máster presenta una estrategia de valorización de escorias de acería mediante la sustitución parcial o completa de los agregados empleados en las capas bituminosas para la construcción de carreteras, teniendo en cuenta la normativa española y europea.



2 Objeto

El presente Trabajo Fin de Máster, plantea la valoración del aprovechamiento de residuos siderúrgicos generados, específicamente, escoria de acería LD y eléctrica para la generación de mezclas bituminosas utilizadas en la preparación de capas de apoyo y rodadura en firmes de viales y carreteras.

Este aprovechamiento implica la sustitución de un árido, mayoritariamente caliza de cantera, por dichas escorias. De esta manera, se conseguiría disminuir el impacto ambiental generado en ambos campos de aplicación, la producción siderúrgica integral y la extracción de materias primas para la construcción de carreteras.

Con el fin de alcanzar dicho objetivo principal, será necesario la caracterización tanto de los materiales actualmente utilizados, como las escorias a evaluar y determinar los requisitos técnicos que definen la aplicación de materiales para su uso en mezclas bituminosas.

Dados los condicionantes derivados del bajo valor añadido de estos productos, se procederá a realizar un análisis del mercado potencial con el fin de establecer las consecuencias de un escalado en la aplicación de esta tecnología.



3 Subproductos generados en el proceso siderúrgico

La industria siderúrgica se clasifica, principalmente, en dos categorías según su proceso y materias primas empleadas:

- **Siderurgia integral:** La siderurgia integral contempla todos los procesos de transformación de mineral de hierro en productos (normalmente semi-acabados) de acero. El factor más característico de este proceso es el empleo de Hornos Altos (*Blast Furnaces* - BF) con el fin de llevar a cabo la transformación del mineral de hierro en arrabio. Este arrabio posteriormente será tratado en el convertidor (*Basic Oxygen Furnace* -BOF) para así obtener el acero.

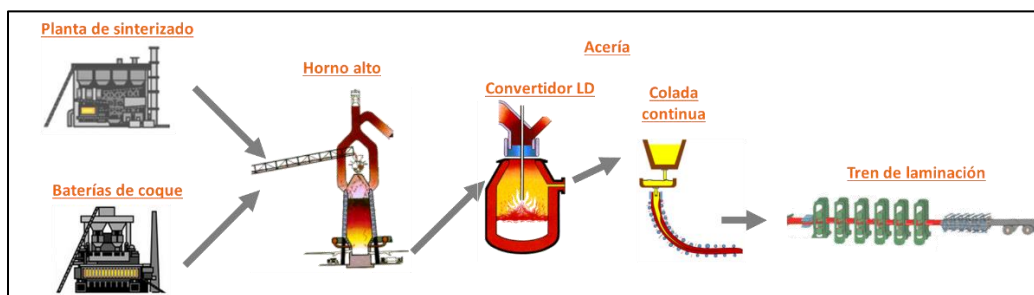


Figura 1: Esquema del proceso siderúrgico integral (fuente propia)

- **Siderurgia eléctrica:** esta industria se basa en la alta tasa de reciclaje del acero, debido a que este material es 100% reciclable³. Por ello, este proceso parte de una materia prima con alto contenido en hierro metálico (mayoritariamente chatarra) que se funde mediante un horno de arco eléctrico (*Electric Arc Furnace* -EAF) y posteriormente se refina.

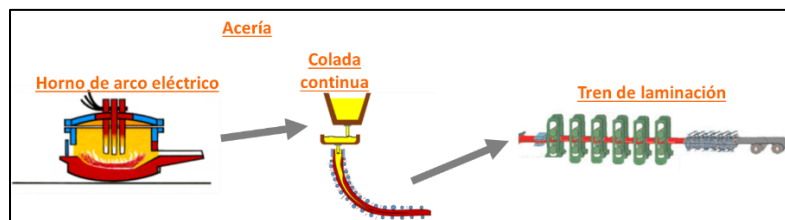


Figura 2: Esquema simplificado del proceso siderúrgico eléctrico (fuente propia)



3.1 Subproductos en la siderurgia integral.

A continuación, se detallan los principales subproductos generados según su etapa en el proceso dentro de la siderurgia integral.

3.1.1 Sínter

El sínter realiza una labor de aglomeración de los distintos minerales de hierro que se introducen en forma de partículas con diferentes granulometrías. Dichas partículas se homogeneizan y aglomeran con el fin de proporcionar una materia prima homogénea al horno alto. Además de mineral de hierro, en este proceso se emplean finos de carbón y fundentes.

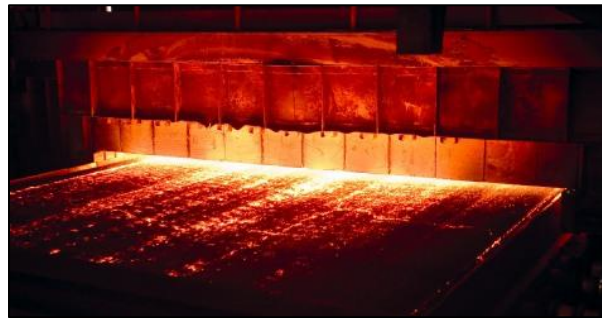


Figura 3: Proceso de sinterización del mineral (ArcelorMittal Gante).
FUENTE: <https://belgium.arcelormittal.com/en/work-environment/sinter-plant/>

Durante este proceso, se generan polvos con una granulometría muy pequeña. Este material se obtiene principalmente del sistema de lavado de los gases de combustión del sínter.

En este lavado de gases, inicialmente se realiza una separación más grosera mediante filtros de mangas, llevándose a cabo el afino final de los gases mediante precipitadores electrostáticos. El material obtenido mediante estos procesos de limpieza se denomina comúnmente, polvos de sínter (*sinter dusts*).



3.1.2 Baterías de coque.

El coque es el resultado de la destilación de los carbones (empleados como materia prima) en cámaras en donde se les aplica un tratamiento térmico a temperaturas ligeramente superiores a 1000°C. Todo este proceso, se realiza en una atmósfera reductora (en ausencia de oxígeno) con el fin de evitar su combustión. El coque posee unas características de dureza, porosidad y resistencia mecánica muy interesantes que favorecen las reacciones ocurridas en el interior del horno alto.



Figura 4: Proceso de deshornado del coque

FUENTE: <http://www.scmholding.com/en/media-centre/library/foto/15/>

Durante este proceso, los volátiles del carbón se desprenden formando los siguientes subproductos⁴:

- Gas de coque.
- Polvos de carbón.
- Alquitranes.
- Licores amoniacales.
- Benzol (BTX).



3.1.3 Horno alto

En el horno alto se lleva a cabo el proceso de reducción del mineral de hierro, empleando material producido en el sinter o pellets de mineral y el coque producido en las baterías con el fin de aportar el carbono necesario para su reducción. Durante este proceso se alcanzan temperaturas de hasta 1800°C en la parte inferior del horno alto con el fin de reducir los óxidos de hierro generando una aleación fundida de Fe-C principalmente. Este material es denominado arrabio (*hot metal, pig iron*)



Figura 5: Sangrado del horno alto – piquera

FUENTE: <http://www.aleastur.com/en/siderurgia-en/blast-furnace-runners/>

Durante este proceso se generan diferentes subproductos debido principalmente a la limpieza de gases y a la eliminación de elementos no deseados en el arrabio.

- Gas de horno alto.
- Polvos de horno alto.
- Lodos de horno alto.
- Escorias de horno alto.



3.1.4 Proceso de acería

La acería es la instalación del proceso en donde el arrabio generado en el horno alto y mediante procesos fisicoquímicos, se transforma en acero. El arrabio, que siendo una aleación de Fe-C, posee demasiado carbono para ser considerado acero (~4%). Este es tratado mediante la adición de oxígeno, con el fin de reducir su contenido en carbono a valores inferiores al 2% para así poder considerarse como acero.

El proceso de colada continua se encarga de solidificar el acero líquido en la forma más conveniente para los procesos de laminación que se dan aguas abajo en el proceso. Los productos más habituales suelen ser planchones (*slabs*) para producir productos planos (bobinas o chapa) y palanquillas (*billets*) con el fin de producir productos largos (perfiles, carril o alambre).



Figura 6: Carga de arrabio en el convertidor

FUENTE: <https://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/new-x-meltr-converter-shop-at-iisco-steel-plant-successfully-commissioned-568/>

Además del proceso de eliminación del carbono, existen otros procesos que son los encargados de afinar la composición química final del acero como son, el proceso de desulfuración (eliminación del azufre) o metalurgia secundaria (afino y adición de aleantes).



Durante este proceso, los subproductos obtenidos por el tratamiento de los gases generados y el afino del arrabio son:

- Lodos de acería.
- Escorias de desulfuración.
- Escorias de convertidor.
- Escorias de metalurgia secundaria.

3.1.5 Procesos de laminación y acabado:

En los procesos de laminación y acabado, los productos intermedios obtenidos en acería se transforman en productos acabados mediante laminación tanto en caliente como en frío. Durante el proceso de laminación en caliente, la capa superficial del acero se oxida dando lugar a la cascarilla. Esta cascarilla es eliminada de la superficie del acero mediante agua a presión. Debido a que en este proceso se emplean diversos tipos de aceites para el correcto funcionamiento de los trenes de laminación, esta cascarilla arrastrada por el agua que también contiene una cantidad reseñable de aceites.



Figura 7: Proceso de descascarillado de la banda

FUENTE:

[https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2010/industry_solutions/iis201011811.htm&content\[\]=IS&content\[\]=ISD&content\[\]=IMT&content\[\]=PDMT](https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2010/industry_solutions/iis201011811.htm&content[]=IS&content[]=ISD&content[]=IMT&content[]=PDMT)



Del tratamiento de estas aguas con el fin de reutilizarlas en el proceso, se generan unos residuos aceitosos comúnmente denominados lodos aceitosos y otros subproductos en los diferentes procesos de acabado como decapado o galvanizado, pero cuya generación es mucho menor adquiriendo un carácter menos relevante.

3.2 Subproductos en la siderurgia eléctrica.

Alternativamente al uso de mineral de hierro, la acería eléctrica basa principalmente su proceso en la producción de acero líquido mediante la fusión de chatarras en un horno de arco eléctrico debido al gran ratio de reciclabilidad del acero.

3.2.1 Horno de arco eléctrico

El material de entrada de los hornos eléctricos no es arrabio a diferencia de los convertidores, sino que se emplea material “frio” es decir, chatarra u otros materiales producidos de la reducción del mineral de hierro como son el carburo de hierro o esponja de hierro (DRI)⁵.

Mediante fusión con arco se producen además algunas calidades especiales de aceros (aleaciones de aceros y otros metales). Durante el proceso de fusión en el horno de arco eléctrico de igual manera que en otros procesos, se generan gases con partículas que se recogen en el sistema de captación mediante filtros de mangas y precipitadores electrostáticos⁶.



Figura 8: Volcado de acero líquido del horno eléctrico.

FUENTE: <http://www.electrothermindia.com/iron-steel-making-machines.html>

Además de polvos, durante el proceso de producción de acero líquido y de manera similar al proceso del convertidor, se generan dos tipos de escorias diferentes⁷:

- Escoria “negra” (EAF C): producida en la generación de aceros al carbono durante el proceso de fusión de la chatarra. Esta es producida por la adición de fundentes como la caliza y/o dolomía. El volcado de la escoria se produce a unos 1600°C y es enfriada al aire.
- Escoria “blanca” (EAF S): se genera en la producción de aceros inoxidable o en aleaciones. En el proceso, chatarra, aleantes y fundentes se funden en el horno de arco eléctrico con el fin de obtener aceros especiales. De igual manera, el volcado de la escoria se produce a unos 1600°C, pero su enfriamiento es controlado en las cucharas de escoria con el fin de obtener una estructura cristalina.

3.2.2 Procesos de laminación y acabado

Al igual que en el proceso siderúrgico integral, los productos semiacabados producidos en la acería eléctrica se laminan con el fin de obtener los productos finales. En este caso, los subproductos obtenidos en esta etapa serán análogos a los obtenidos en los trenes de laminación del proceso siderúrgico integral.



A modo de resumen, los principales subproductos generados en la industria siderúrgica se indican en la Figura 9.

Con el fin de conocer la relevancia de los residuos y subproductos siderúrgicos en una planta se presentan a modo de ejemplo algunos de ellos detallados en la Autorización Ambiental Integrada de las Factorías de Avilés y Veriña de ArcelorMittal⁸.

Tabla 1: Generación de subproductos- AAI ArcelorMittal Asturias 2006⁸

Subproducto	Generación anual (t/año)
Escoria horno alto	1.108.176
Escoria LD sub-producto	132.882
Alquitrán seco	82.984
Benzol	12.679
Sulfato amónico	22.881

Tabla 2: Algunos residuos principales generados en las instalaciones de ArcelorMittal Asturias⁸

Instalación	Residuo	Categoría	Código LER	Generación anual (t/año)
Parque de minerales	Polvo de captación RENFE-1	No peligroso	100208	452,8
	Polvo de captación torre-4	No peligroso	100208	1.169,8
Baterías de cok (Avilés y Gijón)	Residuos de tubería de gas mixto (GHA+GCK)	Peligroso	100207	18,3
	Residuos de limpieza de talleres	Peligroso	150202	21,7
Hornos Altos (Gijón)	Polvos de captación de la nave de colada	No peligroso	100208	9.515,1
	Lodos de horno alto	No peligroso	100214	13.004
	Lodos de horno alto	No peligroso	100214	6.351
	Lodos de horno alto	No peligroso	100214	6.221



Planta de desulfuración	Polvo de desulfuración de arrabio	Peligroso	100207	651,8
Acería de Avilés	Lodos gruesos del proceso de lavado del gas de acería LD	No peligroso	100214	15.035
	Lodos finos del proceso de lavado del gas de acería LD	No peligroso	100214	45.486
	Lodos finos del proceso de lavado del gas de acería LD	No peligroso	100214	10.259
	Polvo de captación secundaria nº 1 y nº 3 (convertidores)	No peligroso	100208	4.465
	Escorias / escombros de acería LD a vertedero	No peligroso	100201	264.482
	Lodos de depuradora de colada continua (filtro prensa)	Peligroso	100211	577,4
	Lodos aceitosos de colada continua (Cto. agua de refrigeración)	Peligroso	130502	928,5
Acería de Gijón	Lodos gruesos del proceso de lavado del gas de acería LD	No peligroso	100214	7.366,7
	Lodos finos del proceso de lavado del gas de acería LD	No peligroso	100214	23.810,8
	Polvo de captación secundaria en LDG	No peligroso	100208	3.694,5
	Escoria / escombros LD a vertedero	No	100201	95.761,7
	Lodos de fosos de colada continua	peligroso	130502	168,4
Laminación TBC	Lodos foso 11 (skimmer sucio)	peligroso	130502	1.898,0
	Grasas, aceites y agua	peligroso	120109	13,3
Laminación cilindros Avilés	Lodos aceitosos de limpieza de fosos	peligroso	120114	83,3
	Lodos de fosos de lavado (fosos centrales)	peligroso	120114	80,8
Tren de chapa gruesa	Lodos de depuradora de chapa gruesa	peligroso	100211	1.511,3
	Lodos aceitosos de depuradora de chapa gruesa	peligroso	130502	32,3



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

	Arenas usadas en filtros de depuradora	peligroso	100211	41,08
Tren de alambón	Lodos de depuradora de alambón	peligroso	100211	3.022,5

Como se puede observar en la realidad se genera una cantidad muy diversa de subproductos y residuos ya que la complejidad del proceso industrial genera residuos muy variados. En este documento se ha simplificado los diferentes tipos con el fin de estructurar claramente que subproductos pertenecen a cada proceso industrial.



PRINCIPALES SUBPRODUCTOS DE LA SIDERURGIA

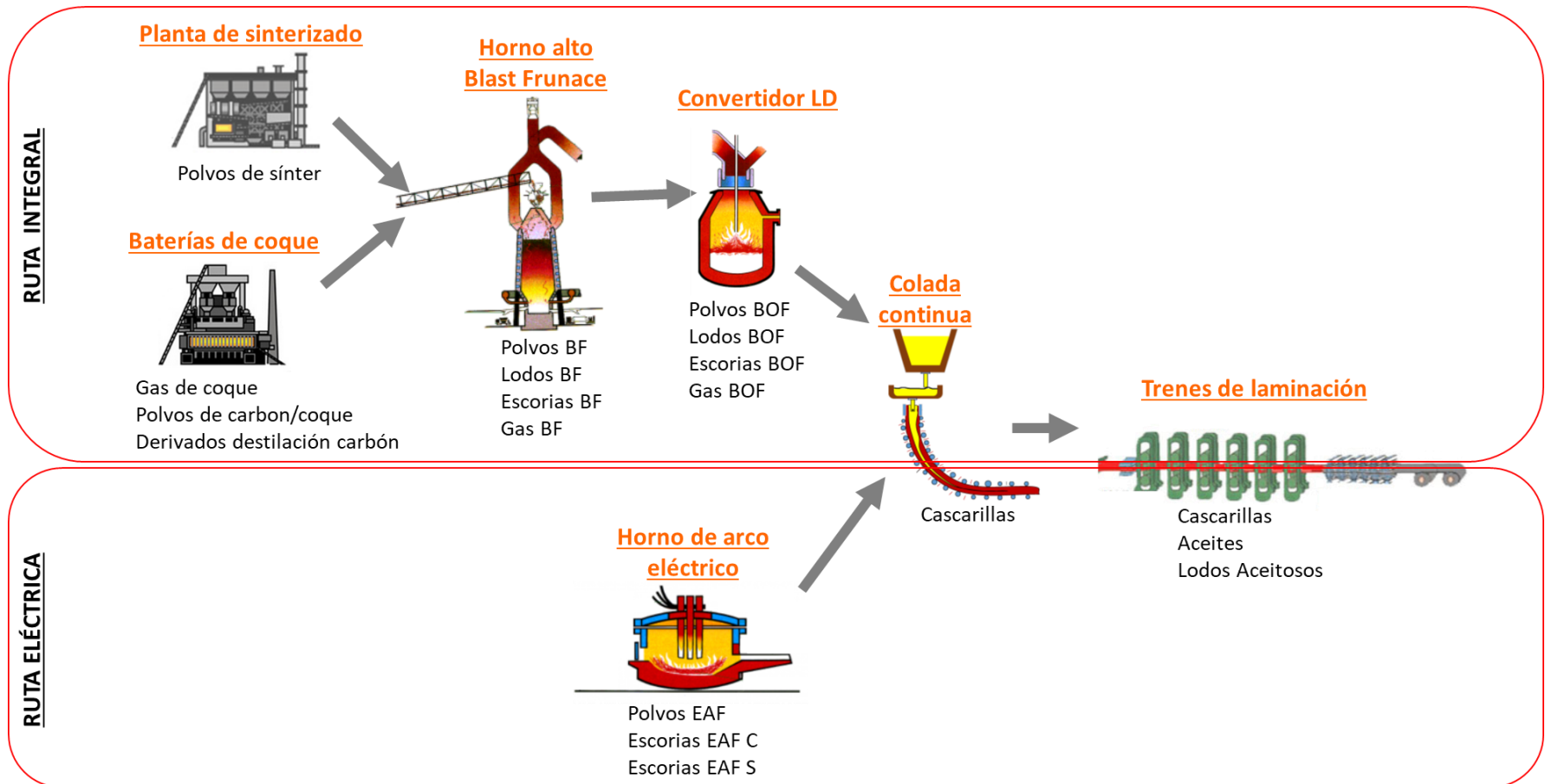


Figura 9: Esquema básico de los principales subproductos de la siderurgia (fuente propia)



4 Proceso y características de las escorias de acería

4.1 Generación.

Durante la conversión del arrabio en acero mediante el soplado de oxígeno y por la adición de diversos fundentes se forma una capa de escorias en la superficie del metal fundido que se utiliza para eliminar los elementos perjudiciales que se encuentran en el arrabio y deben ser evitados en el acero. Con el fin de comprender los diferentes tipos de escorias generadas en la acería a continuación, se detallarán las operaciones llevadas a cabo en la acería.

4.1.1 Tratamiento de desulfuración del arrabio.

A pesar de que este tratamiento se suele llevar a cabo en unas instalaciones fuera de la acería (en el camino del arrabio del horno alto al convertidor), se tiene en cuenta ya que el proceso de eliminación de la escoria generada durante el proceso de desulfuración, siempre se lleva a cabo en la propia acería (*deslagging o skimming*).



Figura 10: Proceso de skimming de la escoria de desulfuración
FUENTE: <http://www.kuettner.com/Default.aspx?ID=545>

El arrabio que se extrae del horno alto contiene impurezas demasiado notables para el proceso de convertidor. Entre otras impurezas se encuentra el azufre, debido a su solubilidad en el arrabio. El azufre no es deseable en el producto final de acero ya que genera estructuras que reducen considerablemente las propiedades del acero, por lo que



es necesario llevar a cabo un proceso de desulfuración. De esta manera, se generan las escorias de desulfuración.

En el proceso de desulfuración se inyectan en el arrabio, cal (CaO), magnesio (Mg), carburo de calcio (CaC₂) y carbonato de sodio (Na₂CO₃) entre otros componentes. El azufre es mayoritariamente atrapado en la escoria formada. Como se ha citado anteriormente, este proceso se lleva a cabo en el transporte del arrabio a la acería en los torpedos⁹.

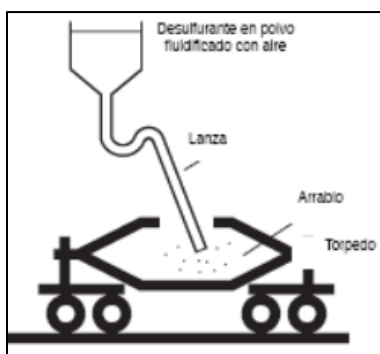
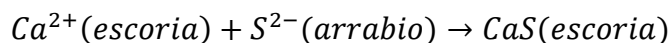


Figura 11: Diagrama del proceso de desulfuración
FUENTE: <https://aceroplatea.es/docs/documento157.pdf>

Una vez los torpedos se encuentran en acería, se ejecuta el volcado del arrabio de los torpedos en la cuchara. Una vez se han volcado los torpedos, y mediante un proceso de *skimming*, la escoria es separada del arrabio (ya que esta se encuentra flotando por diferencia de densidades). De esta manera, la escoria generada durante el transporte, y principalmente durante el proceso de desulfuración, es eliminada del arrabio¹⁰.

4.1.2 Proceso de convertidor

El proceso de convertidor se divide principalmente en 3 etapas:

- Etapa de carga.
- Etapa de soplado.
- Etapa de vaciado.



Durante la etapa de carga, la chatarra, empleada principalmente como carga férrica adicional y refrigerante, se introduce en el fondo del convertidor para así proteger el refractario. Pasada esta etapa, se procede a introducir el arrabio en el convertidor y comienza la etapa de soplado. Durante los primeros minutos del soplado se adicionan también los fundentes.

En el proceso de soplado, se eliminan 4 elementos presentes en el arrabio, esto son: silicio, fósforo, manganeso y carbono. La primera etapa del soplado produce una oxidación del silicio presente en el arrabio además de existir una oxidación parcial del fósforo y manganeso.

La segunda etapa, comúnmente denominada etapa de decarburación creciente, produce inicialmente la oxidación del manganeso, posteriormente del carbono y una vez ha finalizado esta última del fósforo. Finalmente, y debido a que el carbono no se elimina de forma homogénea en todo el convertidor, se produce una difusión del carbono y una pequeña eliminación del azufre.

Durante todo este proceso continuo de soplado y gracias a la adición de los fundentes, se genera en la superficie del metal fundido una capa de escoria. En ella se recogen todos los elementos no deseables en el acero líquido. Es importante destacar que algunos elementos como el carbono, al oxidarse generan una fase gaseosa que no queda atrapada en la escoria si no que pasan a formar parte de los gases generados en el proceso del convertidor.

Una vez finalizado el proceso del soplado, se inclina el convertidor para comenzar con el volcado del acero líquido en la cuchara de colada. Durante el proceso de vaciado del acero líquido, se adicionan las ferroaleaciones con el fin de conseguir las propiedades finales del acero en la metalurgia secundaria. Una vez finalizado, el convertidor se inclina hacia el lado opuesto para vaciar la escoria en la cuchara de escorias para vaciar completamente el convertidor.

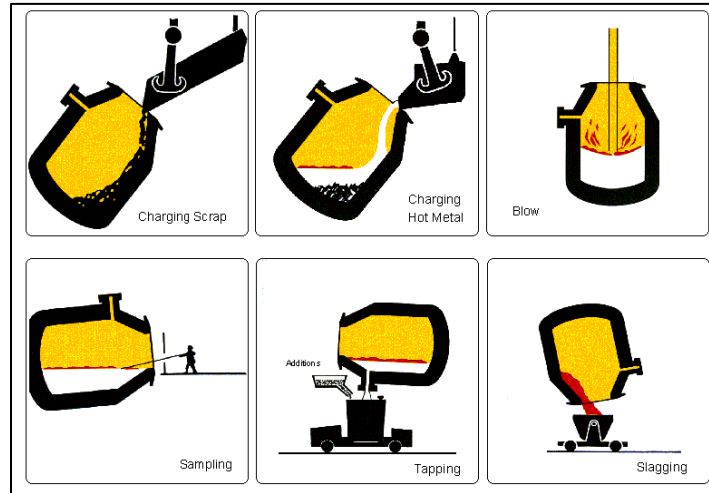


Figura 12: Etapas en el proceso de convertidor
FUENTE: https://www.steelconstruction.info/Steel_manufacture



Figura 13: Volcado de escoria en cuchara
FUENTE: <http://mapio.net/pic/p-24952401/>

4.1.3 Proceso de metalurgia secundaria

El proceso final de acería se denomina metalurgia secundaria. En este proceso se afinan las cualidades finales que se desean obtener en el acero antes de incorporarlo al proceso de colada continua¹¹.

- Homogeneización térmica y química.
- Desgasificación, eliminación de gases (hidrógeno nitrógeno).
- Desoxidación.



- Eliminación de impurezas (desulfuración / defosforación).
- Modificación de inclusiones.
- Agregado de aleantes.
- Decarburación.
- Ajuste de temperatura de colada.

Al igual que en los anteriores procesos, se generan escorias durante el proceso de metalurgia secundaria que serán eliminadas de igual manera del acero líquido antes de la colada¹².

Por lo tanto, existen tres tipos de escorias generadas durante el proceso de acería:

- Escorias de desulfuración.
- Escorias de convertidor.
- Escorias de metalurgia secundaria.

Dado que los tiempos y el proceso de generación de cada una de las escorias es diferente, su tratamiento posterior y sus posibles usos también lo son.

Las escorias de desulfuración y metalurgia secundaria normalmente se dejan enfriar en las mismas cucharas que se emplean para recogerlas en estado líquido. Estas cucharas se transportan a una explanada en donde el material del interior es volcado una vez haya enfriado y se encuentre en estado sólido. Cuando ha enfriado lo suficiente, este material se tritura y se envía a la planta de procesamiento en donde se recuperará la fracción metálica de la escoria.



Figura 14: Proceso de trituración de las escorias solidificadas.
FUENTE: <http://fractum.com/industries/steel-industries/slag-pot-deskulling/>

Las escorias generadas en el convertidor o escorias BOF, se procesan de manera diferente a las anteriores. Debido a su mayor producción, las cucharas que recogen este tipo de escorias vuelcan la escoria, aún en estado fundido, en unos fosos en los que se enfriarán mediante el uso de agua. Una vez su temperatura ha disminuido lo suficiente como para ser manipulada, esta se carga en un camión para recuperar su fracción metálica.



Figura 15: Volcado de escorias en foso (izquierda) y regado de escorias con agua (derecha)
FUENTES: <http://buildindustrialpakistan.blogspot.com/2014/03/ld-converter-slag-disposal-facilities.html> y
<https://www.hennlich-engineering.com/applications/fog-cannons/steel-slag.html>

A no ser que se requiera para alguna aplicación concreta, en la planta de tratamiento de las escorias se introducen los dos tipos de escorias indistintamente formando un “todo uno” bajo la denominación genérica de escorias de acería, aunque no sean exactamente todas ellas las escorias generadas en el proceso de soplado del convertidor.



5 Características de las escorias de acería

5.1 Composición química

Desde un punto de vista cuantitativo, las escorias generadas en la acería, producidas en el convertidor (escorias BOF – *BOF slags*) durante el proceso de soplado, son mucho más relevantes: se generan aproximadamente 110 kg de escoria por tonelada de acero producido¹³.

Algunos ejemplos de composiciones químicas de este tipo de escorias se indican a continuación.

Tabla 3: Ejemplo de dos composiciones químicas de escorias BOF

Fuente	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO
¹⁴	47,5	6,3	2,0	11,8	2,7	---	0,5	1,9	22,6	--
¹⁵	46	7	1,5	10	2		----	6	--	27

Una de las mayores problemáticas para la reutilización de este tipo de escorias es su contenido en cal libre que puede llegar hasta el 15% por lo que su empleo en aplicaciones en las que se requiera un árido estable resulta limitado¹⁴.

Las escorias producidas en metalurgia secundaria, también denominadas escorias de cuchara o *ladle slags*, se producen en mucha menor medida: aproximadamente 150 kg de escoria por tonelada de acero en el proceso de decarburación con argón (*Argon Oxygen Decarburization- AOD*), y unos 44 kg de escoria en la decarburación en vacío (*Vacuum Oxygen Decarburization- VOD*), siendo este último el proceso más utilizado actualmente¹⁶.

Algunos ejemplos de composiciones químicas de este tipo de escorias de metalurgia secundaria son los siguientes:



Tabla 4: Ejemplo de composición química de escorias de metalurgia secundaria.

Fuente	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	MnO	SO ₃
¹⁷	6,53	30,86	2,33	8,69	---	0,31	0,33	0,14	0,02	4,52	---	---
¹⁴	14,7	49,60	25,60	0,22	0,44	---	---	---	0,20	7,90	0,40	0,80

Como puede observarse la composición química de este tipo de escorias resulta muy variable ya que depende directamente del grado de acero a conseguir. Por lo tanto, dependiendo de los productos finales de cada planta siderúrgica estas escorias poseerán unas composiciones químicas u otras.

Las escorias de desulfuración poseen un alto contenido en CaO, Al₂O₃, SiO₂, óxidos de Fe y SO₃ principalmente. En condiciones normales de operación, se generan alrededor de 1 tonelada de escoria de desulfuración por cada 50 toneladas de arrabio tratado (alrededor de 20 kg/t arrabio)¹⁸.

Algunos ejemplos de la composición química de las escorias de desulfuración se presentan en la tabla 5. Ha de tenerse en cuenta que la composición de este tipo de escorias no depende únicamente del propio proceso de fabricación del acero, sino del tipo de materia prima empleada, por lo que puede variar considerablemente comparando las escorias de unas plantas siderúrgicas a otras.

Tabla 5: Ejemplos de composición química de escorias de desulfuración

Fuente	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	So ₃	K ₂ O	Na ₂ O	f-CaO	Fe ₂ O ₃	MnO
¹⁹	4,22	69,08	9,33	0,08	2,33	2,33	4,3	0,06	0,14	0,95	8,23	0,6
²⁰	3,48	66,16	15,71	----	2,29	0,57	3,42	--	---	---	7,35	0,45

Los tres tipos de escorias anteriormente citadas suelen englobarse en la categoría de escorias de acero/acería o *Steel slags*. Dado que muchas veces estas escorias se mezclan para su posterior procesado, se suele establecer una composición genérica de estas escorias “todo uno”. La Asociación Europea de Productores y Procesadores de Escorias Metalúrgicas las define con la siguiente composición química²¹.



Tabla 6: Composición genérica de escorias de acería²¹

Constituyente	Porcentaje en peso
CaO	35-45
SiO ₂	11-17
Al ₂ O ₃	1-6
MgO	2-9
FeO	16-26
MnO	2-6
P ₂ O ₅	1-2
Stotal	0-0,2
Cr ₂ O ₃	0,5-2

5.2 Propiedades físicas

Además de propiedades químicas, las escorias producidas en acería se caracterizan por tener unas buenas propiedades mecánicas y por las cuales resultan interesantes en muchas aplicaciones para la sustitución de un agregado natural.

Según el informe realizado por el CEDEX en 2012 en el que se caracterizaban las escorias siderúrgicas, este tipo de agregado se caracteriza por ser un árido muy limpio, pesado, anguloso, poco pulimentable y de gran dureza²².

Las características de estas escorias se estudiaron sobre escorias proporcionadas por ENSIDESA (ahora ArcelorMittal) y sobre dos fracciones granulométricas determinadas, 5/10 y 10/20. Las propiedades físicas obtenidas en el estudio se presentan a modo de resumen en la tabla 7.



Tabla 7: Características físicas de las escorias de acería (CEDEX, 2012)²²

Ensayo	Resultado
Partículas con 2 o más caras de fractura	100%
Limpieza superficial	0,02 %
Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Angeles	14,06 %
Pulimiento acelerado de los áridos	0,55%
Índice de lajas	7%
Peso específico de las partículas	3,25 t/m ³
Porosidad (Aceite de parafina)	4,33 %

Por último, las escorias de acería poseen un contenido en cal libre (f-CaO) y magnesia libre (MgO) siendo este el principal factor limitante a la hora de su aplicación como material destinado a construcción u otras actividades que requieran una estabilidad volumétrica importante. En presencia de agua, estos dos óxidos reaccionan y se hidratan produciéndose así un hinchamiento del material. La duración de este proceso de hidratación puede darse en escalas de días e incluso meses.



6 Acciones para la mejora de las propiedades de la escoria.

La estabilidad volumétrica depende de la existencia de cal y magnesia libre en la escoria de acería. La eliminación de esta propiedad permite ampliar su aplicación a aquellos usos estructurales que precisan materiales estabilizados.

Existen varios métodos de estabilización, todos ellos basados en la mejora de la interacción entre la escoria y agua/humedad con el fin de acelerar su hidratación y así poder conseguir un material estable.

Estabilización atmosférica. El método más sencillo para reducir el contenido en cal y magnesia libre de las escorias generadas en la acería es su extensión del material en un terreno en capas de poco espesor. Sobre dichas capas se lleva a cabo un riego del material y se voltea con el fin de que reaccione homogéneamente. La principal problemática de este procedimiento es la gran cantidad de espacio requerido para llevarla a cabo.



Figura 16: Stock de escorias BOF a la intemperie
FUENTE: <http://scrapbook.majesticsteel.com/slag-sustainability/>

Estabilización por vapor: En aquellos lugares donde las necesidades de espacio son muy importantes, se puede llevar a cabo la estabilización de la escoria empleando vapor de agua, método desarrollado en Japón. Las escorias se acumulan en parvas que se cubren en su parte superior con una lámina impermeable de plástico. El vapor es inyectado en el interior



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

de las parvas consiguiéndose en unos 6 días unos coeficientes de expansión muy bajos (menos del 0,5%)²³.



Figura 17: Proceso de estabilización por vapor en Kokura Works desarrollado en 1992

Estabilización a alta presión: Un proceso similar al anterior y usado nuevamente en Japón es la estabilización de las escorias a alta presión. La escoria se introduce en un autoclave durante unas 3 horas aproximadamente a una presión de unos 0,5 MPa. En este proceso también se inyecta vapor de agua, consiguiéndose unos valores de expansión menores al 0,5%²⁴.



Figura 18: Instalaciones de envejecimiento a presión de Nippon Steel y Sumitomo Metal²³

Termoestabilización. Se han desarrollado algunos procesos de estabilización de la escoria cuando aún se encuentra en estado fundido. Uno de los más estudiados ha sido la inyección de sílice/arena (SiO_2) junto con oxígeno mientras la escoria se encuentra en este estado. En



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

este proceso se forman nuevas fases mineralógicas en las que el Ca forma fases estables que evitan su posterior hidratación. La expansión final de las escorias es también inferior al 0,5%²⁵.



Figura 19: Lanza de inyección de sílice (CSC)

FUENTE: <http://www.csc.com.tw/csc/ts/ena/pdf/no28/09.PDF>



7 Aplicaciones actuales de las escorias de acería.

Según la Asociación Mundial del Acero (*Worldsteel Association*) la producción de escorias en el mundo se sitúa en más de 400 millones de toneladas anuales. Las escorias suponen el 90% (en masa) de la generación de los subproductos sólidos del proceso. El proceso siderúrgico industrial genera unos 400 kg de subproductos sólidos tanto de BF como BOF, mientras que el proceso de reciclaje de acero por horno de arco eléctrico genera unos 200 kg de subproductos por tonelada de material. De los 400 kg generados en el proceso integral unos 260 kg son escorias BF, mientras que las escorias generadas en el convertidor son unos 140 kg²⁶.

Según datos de un estudio realizado por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), en diciembre de 2012 la producción en España de escorias de acería LD en 2007 fue de 573.000 toneladas, de las cuales 79.000 t fueron recicladas internamente, 70.000 toneladas fueron empleadas en diferentes aplicaciones y el resto se almacenaron. Las dos únicas acerías LD existentes en España pertenecen a la empresa siderúrgica ArcelorMittal S.A emplazada en la provincia de Asturias situada al norte de España²².

A nivel europeo, la Asociación Europea de Productores y Procesadores de Escoria realizó un estudio en 2010 en el que indica que la producción europea de escorias procedentes de acería fueron 21,8 millones de toneladas de las cuales un 48% fueron escorias de convertidor LD, un 13% pertenecientes a metalurgia secundaria y el 39% restantes fueron generadas en el proceso de acería eléctrica (8% escorias blancas y 31% escorias negras)²⁷.

Algunas de las aplicaciones de las escorias de acería que se citan en el estudio del CEDEX son²⁸:

Obras de tierra y terraplenes: construcciones de rellenos y terraplenes en los que este tipo de escorias podría ser viable a pesar de su expansión.



Carreteras: se puede aplicar como árido en capas granulares bases y subbases, únicamente este material no debe emplearse en capas que posean conglomerantes hidráulicos o en aplicaciones donde vaya rígidamente confinado ya que pequeñas expansiones pueden producir importantes deterioros.

Hormigones: previo tratamiento con el fin de reducir su expansividad volumétrica, las escorias se han empleado como sustitución de áridos naturales en las construcciones.

Ferrocarril: su uso como agregado en sustitución del balasto natural en vías de tren se ha llevado a cabo. Existe experiencia pasada en la aplicación de este material en vías ferroviarias de Brasil por parte de ArcelorMittal Tubarao en el que se emplearon escorias para tal fin. Pasados unos años se dejaron de emplear ya que se detectaron problemas con el tamaño de partícula, así como errores de señal debido a la conductividad eléctrica de la escoria.

Fabricación de Clinker: ya que este tipo de escorias suele poseer altos contenidos de alúmina y calcio, este material podría ser utilizado en la industria cementera para la producción de Clinker. La principal problemática para esta aplicación es la presencia de Fe en la composición que puede afectar al refractario del horno rotatorio en el que se produce el Clinker.

Otras aplicaciones con menor volumen de mercado incluyen, por ejemplo, el uso en el tratamiento de aguas residuales, el empleo en la producción de lana de roca o su uso como fertilizante, entre otras⁷.

Además de todas estas aplicaciones también se encuentran en fase de desarrollo o investigación otras muchas con el fin de valorizar la mayor cantidad de escoria y así minimizar el impacto generado por la industria al reducir los subproductos generados en el proceso. Algunas de estos otros usos pueden ser por ejemplo el empleo de escorias en la captura de CO₂, la desulfuración de gases²⁹, sustrato para el crecimiento de algas o material de relleno de fondos marinos^{30 31} entre otras aplicaciones.



Según la Asociación Europea de Escorias (EUROSLAG), un 66% de la escoria BF se emplea para la industria cementera, un 23% se emplea en la construcción de carreteras como material de relleno, un 10% se almacena internamente y el restante 1% se emplea en aplicaciones menores⁷.

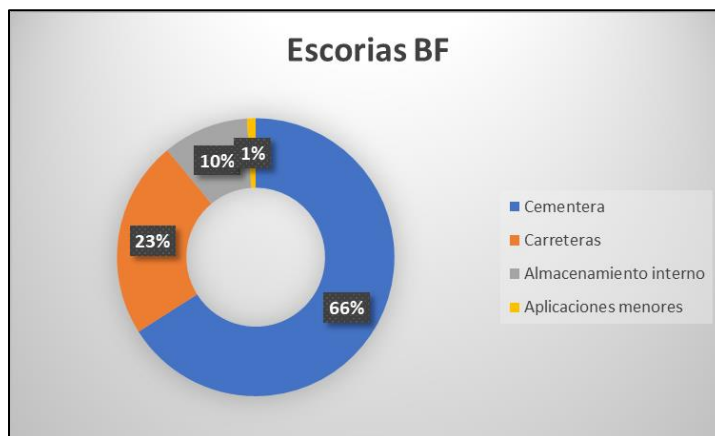


Figura 20: Aplicaciones de las escorias de horno alto (EUROSLAG)

Con respecto a las escorias generadas en la acería, un 48% se emplea en la construcción de carreteras, un 6% en la producción de cemento, un 3% se emplea en ingeniería hidráulica, el 3% en agricultura, un 10% se recicla internamente, un 11% se almacena internamente, un 13 se envía a vertedero y el 6% restante se emplea en aplicaciones menores⁷.

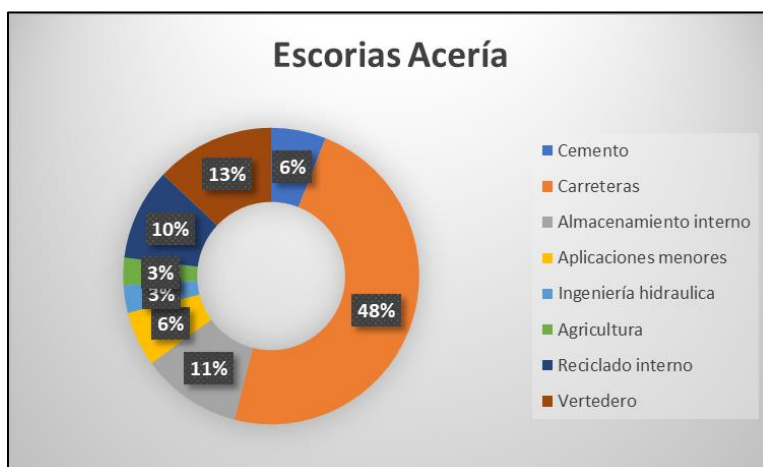


Figura 21: Aplicaciones de escorias de acería (EUROSLAG)



A nivel nacional, durante el año 2015, UNESID, con el apoyo del Ministerio de Industria, ha logrado que el procedimiento de clasificación de subproductos publicado por el Ministerio de Medio Ambiente incluya la posibilidad de clasificar algunos tipos de materiales como subproductos. De esta manera, se reducen las cargas burocráticas para así permitir un acceso al mercado en igualdad de condiciones que los materiales naturales, abriendo el mercado para el uso de estas escorias³².

Aunque los porcentajes de reaprovechamiento resultan aparentemente altos hay tres factores que se deben considerar por su afectación a la industria siderúrgica y al medio ambiente:

1. Las escorias utilizadas masivamente son las procedentes de Horno Alto que, por su carácter estable, no requieren tratamiento previo, quedando destinadas a vertedero prácticamente todas las escorias de acería.
2. Incluso en el caso de las escorias de horno alto, la crisis del sector de la construcción ha provocado la existencia de excedentes que, en la actualidad, hay que destinar a vertido.
3. En las cantidades generadas resulta inviable e ilegal mantener los flujos de residuos a vertedero considerando que se acumulan cientos de miles de toneladas cada año.

Es por esto que el objetivo de este trabajo es la valoración del aprovechamiento de escorias de acería en un sector específico: las mezclas bituminosas.



8 Mezclas bituminosas en carreteras

Las carreteras se pueden dividir principalmente en 3 partes diferenciadas:

- Terreno subyacente: se denomina como tal, al terreno natural que se encuentra inicialmente en la zona.
- Explanada: material, normalmente adecuado (estabilizado) sobre el cual se aplicará el firme de la vía. La explanada se emplea tanto para conseguir propiedades mecánicas necesarias del terreno como para mitigar las propias irregularidades de este. El tipo de explanada a conseguir generalmente viene dado por el tipo de terreno subyacente sobre el que se encuentre la obra.
- Firme: el firme se divide en 2 capas principalmente, la base y el pavimento. Estas capas se encontrarán dimensionadas según el tipo de tráfico o categoría de vía específica y contará con materiales de mayor calidad con el fin de soportar las cargas. El pavimento, estará normalmente formado por mezclas bituminosas en caliente y se encuentra dividido a su vez en tres capas diferentes (capa base, intermedia y de rodadura).

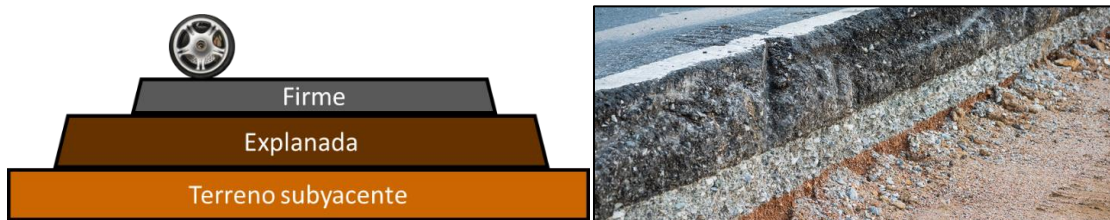


Figura 22 Capas principales de una carretera
FUENTE: izquierda - propia, derecha - <http://www.drASFALTO.com.br/servicos>

Con el fin de determinar las características técnicas de una carretera, se deberán de conocer inicialmente los requerimientos para la vía en construcción. Por tanto, inicialmente se ha de considerar que categoría de tráfico posee la vía. Con ello se podrán dimensionar las diferentes capas de la vía. Además, para la selección del betún será necesario establecer la zona climática correspondiente a la que pertenece la vía.



8.1 Categoría de tráfico

El Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) establece mediante una tabla (tabla 8), la categoría que poseerá la carretera según el número de vehículos pesados que circularán al día sobre esa vía. A continuación, se detalla en la tabla 8 la categoría de la vía según su tráfico³³:

Tabla 8: Categorías de tráfico según el número de vehículos pesados al día

Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	≥ 4 000	< 4 000	< 2 000	< 800	< 200	< 100	< 50	< 25
		≥ 2 000	≥ 800	≥ 200	≥ 100	≥ 50	≥ 25	

De esta manera, las vías con una mayor exigencia serán las T00 y T0, mientras que las de menor exigencia serán las categorías T3 y T4.

Ha de tenerse en cuenta que, además de la vía principal, se deben de tener en cuenta otras vías pertenecientes al mismo tramo de carretera como ramales o vías de servicio. La categoría seleccionada para el posterior dimensionamiento será la más restrictiva en cuanto a sus características.

8.2 Dimensionamiento de la explanada

La categoría de la explanada vendrá definida por su módulo de compresibilidad. De esta manera se establecen 3 tipos de explanadas según su módulo de compresibilidad. Este parámetro viene establecido por normativa según la NTL-357 “Ensayo de carga con placa”.

La tabla 1 del anexo define los valores límite para cada una de las categorías de explanada. Además, se deberá de cumplir límite máximo de deflexión también indicado en la tabla.

Estos valores límites vienen establecidos por la norma 6.1-IC para cada uno de los diferentes tipos de explanada a construir.



Según la capa subyacente de terreno mayor de 1 metro de espesor en el que ha de situar la explanada, se optará por la aplicación de un tipo u otro. Los tipos de terrenos establecidos son:

- Inadecuados y marginales (IN)
- Tolerables (0)
- Adecuados (1)
- Seleccionados (2)
- Seleccionados con $CBR \geq 20$ en las condiciones de puesta en obra (3)
- Roca (R)

En la tabla 2 del anexo, se detallan los tipos de explanaciones necesarias con el fin de conseguir una de las tres categorías citadas anteriormente teniendo en cuenta el terreno subyacente sobre el que se ha de construir.

Respecto a la aplicación de subproductos en esta capa de construcción de la vía, la normativa cita textualmente lo siguiente: “Las explanadas construidas con materiales diferentes a los considerados (residuos, subproductos, etc.) serán clasificadas, cuando sea posible, por analogía y, en otro caso, mediante un estudio específico”, es decir que la normativa permite este tipo de acciones.

Además del terreno subyacente sobre el que construir la vía, se ha de tener en cuenta el tipo de vía según su categoría de tráfico. Por tanto, las dimensiones de cada una de las capas de la vía vendrán también delimitadas por este último punto detallándose en el siguiente apartado.

8.3 Dimensionado del firme

Las secciones de firme presente en las vías serán diseñadas teniendo en cuenta la Instrucción de carreteras (Norma 6.1 IC) y los artículos 542 y/o 543 para hormigones



bituminosos de la orden FOM/2523/2014 sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

Como se ha mencionado anteriormente, el firme se divide básicamente en una capa base y una capa de pavimento. Estas dos capas se encargan principalmente de soportar las cargas que se darán en la carretera, así como de ofrecer estabilidad y resistencia a la carretera.

La capa base se compondrá principalmente de materiales como la zahorra artificial, suelocemento, gravacemento y hormigón magro vibrado, mientras que el pavimento se realizará generalmente con mezclas bituminosas y en algunos casos, aunque en menor medida, con hormigones de firme.

De esta manera y teniendo en cuenta los puntos anteriores, los espesores y combinaciones de materiales empleados vendrán determinadas según la categoría de la vía y explanada según la Norma 6.1 IC.

En la tabla 3 del anexo y a modo de resumen, se indica según la categoría de vía y explanada donde se podrán realizar firme con diferentes materiales. Además, en la tabla 4 del anexo, se indican en detalle cada uno de los espesores mínimos de las capas dependiendo de los materiales a emplear según la normativa española.

8.4 Materiales para el firme

Los materiales que se detallan en el PG-3 para la construcción de los firmes en carretera y son los siguientes:

- Mezclas bituminosas en caliente (D, S y G)
- Mezclas bituminosas discontinuas en caliente (M y F)
- Mezclas bituminosas drenantes (PA)
- Mezclas bituminosas abiertas en frío (FA)
- Mezclas bituminosas de alto módulo (MAM)
- Pavimento de hormigón



- Materiales tratados con cemento (gravacemento, suelocemento)
- Grava emulsión
- Gravaescoria
- Zahorra artificial
- Macadam

8.5 Mezclas bituminosas en caliente

Como se ha comentado anteriormente, las mezclas se componen de un betún asfáltico actuando como matriz, áridos (pueden existir granulometrías continuas o discontinuas), polvo mineral y en ocasiones aditivos.



Figura 23: Aplicación de dos capas diferentes de mezclas asfálticas

FUENTE: <http://www.pavementinteractive.org/pavement-typesasphalt-concrete-base-acb/>

Es importante destacar que no siempre han de existir tres capas en la capa bituminosa y esto vendrá definido por el material deseado a emplear en cada una. Por lo tanto, las carreteras podrán tener 3, 2 e incluso una capa de rodadura siempre que se cumplan los requisitos.

A continuación, se procede a definir la elección de cada uno de los materiales que conforman las mezclas bituminosas.



Ligante bituminoso/betún asfáltico:

La elección del ligante bituminoso, así como la relación entre su dosificación en masa y la del polvo mineral en este tipo de mezclas vendrá determinado por la zona térmica definida en la figura 24.

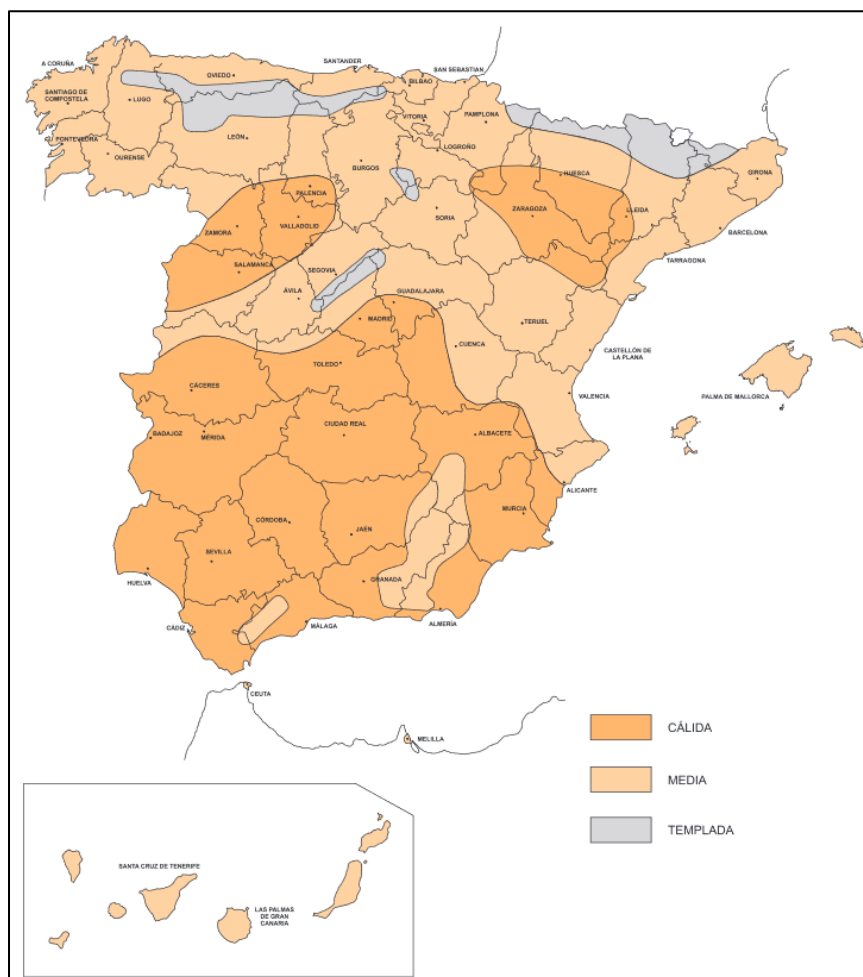


Figura 24: Regiones climáticas de España para la construcción de carreteras

Teniendo en cuenta la zona en la que se requiere la aplicación de la mezcla asfáltica, el tipo de ligante hidrocarbonado o betún vendrá dado por la tabla 9.



Tabla 9: Tipos de ligantes hidrocarbonados a emplear en capas de rodadura e intermedia

Tipo de ligante hidrocarbonado a emplear en capa de rodadura y siguiente					
Zona térmica estival	Categoría de tráfico pesado				
	T00 y T0	T1	T2 Y T31	T32 y Arcenes	T4
Cálida	35/50 BC35/50 PMB	35/50 BC35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70
Media	35/50 BC35/50 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 70/100 BC50/70	
Templada	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	50/70 70/100 BC50/70 PMB 45/80-60			

Tabla 10: Tipos de ligantes hidrocarbonados a emplear en capas base

Tipo de ligante hidrocarbonado a emplear capa de base, bajo otras dos				
Zona térmica estival	Categoría de tráfico pesado			
	T00	T0	T1	T2 y T3
Cálida	35/50 BC35/50		35/50 50/70	50/70 BC50/70
Media	PMB25/55-65		BC35/50 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70
Templada	50/70 70/100 BC50/70			70/100



Áridos:

El origen de los áridos podrá ser tanto de origen natural como artificial. Estos áridos de proporcionarán en diferentes fracciones granulométricas que se acopiarán y manejarán por separados hasta la producción de la mezcla.

Árido grueso es toda aquella parte del árido total retenida en el tamiz de 2 mm (norma UNE-EN 933-2). En capas de rodadura el árido será de una única naturaleza, no pudiendo ser para capas de rodadura en vías T00 y T0 de canteras de naturaleza caliza ni trituración de gravas.

Las características de este tipo de árido se definen en la siguiente sección ya que será el material en el cual se emplearán escorias siderúrgicas generadas en acería.

Árido fino se define como aquella parte del árido que se encuentra entre los tamices de 0,063mm y 2 mm (norma UNE-EN 933-2). Su origen ha de ser en su totalidad de trituración de piedra de cantera o grava natural (T3, T4 y arcenes podrán emplear arena natural con restricciones). Además, el árido fino deberá de cumplir las condiciones exigidas al árido grueso.

El polvo mineral se define como el árido cuya mayor parte pasa por el tamiz de 0,063 mm (UNE-EN 933-2). Éste ha de ser un producto comercial o un material especialmente preparado. La proporción de polvo mineral a emplear viene determinada por la siguiente tabla:

Tabla 11: Proporción de polvo mineral de aportación

Proporción de polvo mineral de aportación					
Tipo de capa	Categoría de tráfico pesado				
	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	100			≥50	
Intermedia	100		≥50		
Base	100	≥50			



Su granulometría viene definida por la siguiente tabla:

Tabla 12: Granulometría del polvo mineral

Apertura del Tamiz (mm)	Huso granulométrico general para resultados individuales cernido acumulado (% en masa)	Amplitud máxima del huso restringido (% en masa)
2	100	
0,125	85 a 100	10
0,063	70 a 100	10

La densidad del polvo mineral estará comprendida entre 0,5 y 0,8 g/cm³.

Por lo tanto, teniendo en cuenta cada una de las diferentes características del material, la composición de las mezclas vendrá definida según su tipo y se denominará de la siguiente manera:

AC || D || surf/bin/base || ligante || granulometría

Donde:

- **AC:** relativo a que la mezcla es del tipo hormigón bituminoso
- **D:** tamaño máximo del árido (expresado como la apertura del tamiz que deja pasar entre el 190 y 100% del total del árido)
- **Surf/bin/base:** tipo de capa de empleo (rodadura, intermedia o base respectivamente)
- **Ligante:** tipo de ligante hidrocarbonado
- **Granulometría:** tipo D (densa), S (semidensa) o G (gruesa). En las mezclas de alto módulo se añadirán las letras MAM



De esta manera, los husos granulométricos de cada uno de los tipos de mezclas vendrán dado por la tabla 13.

Tabla 13: Husos granulométricos de las mezclas bituminosas

Tipo de Mezcla		Apertura de los tamices (UNE-EN 933-2 (mm))									
		45	32	22	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
Densa	AC16 D			100	90-100	64-79	44-59	31-46	16-27	11-20	4-8
	AC22 D		100	90-100	73-88	55-70		31-46	16-27	11-20	4-8
Semidensa	AC16 S			100	90-100	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	3-7
	AC22 S		100	90-100	70-88	50-66		24-38	11-21	7-15	3-7
	AC32 S	100	90-100		68-82	48-63		24-38	11-21	7-15	3-7
Gruesa	AC22 G		100	90-100	65-86	40-60		18-32	7-18	4-12	2-5
	AC32 G	100	90-100		58-76	35-54		18-32	7-18	4-12	2-5

El espesor de cada capa vendrá dado en función del tipo de mezcla a emplear. En la tabla 14 se indica el espesor de capa a emplear en las diferentes capas bituminosas teniendo en cuenta el tipo de mezcla a emplear. Además, se incluye la denominación anterior de este tipo de mezclas ya que actualmente sigue siendo de uso habitual³⁴.



Tabla 14: Espesor de las capas de firme según su mezcla bituminosa

Tipo de Capa	Tipo de Mezcla		Espesor (cm)
	Denominación Norma UNE-EN 13108-1	Denominación antigua	
Rodadura	AC16 surf D	D12	4-5
	AC16 surf S	S12	
	AC22 surf D	D20	>5
	AC22 surf S	S20	
Intermedia	AC22 bin D	D20	5-10 MAM → 6-10
	AC22 bin S	S20	
	AC32 bin S	S25	
	AC22 bin S MAM	MAM	
Base	AC32 base S	S25	7-15 MAM → 7-13
	AC22 base G	G20	
	AC32 base G	G25	
	AC22 base S MAM	MAM	
Arcenes	AC16 surf D	D12	4-6

En el caso de que en las capas de rodadura se empleen con mezclas bituminosas discontinuas o drenantes los espesores de la capa serán diferentes teniendo en cuenta la mezcla ya que son un tipo muy concreto de asfaltos (valores definidos en el PG-3).

La cantidad de ligante hidrocarbonado a emplear vendrá dada en función del tipo de capa y el tipo de mezcla a emplear según se indica en la tabla 15.

Tabla 15: Dotación mínima de ligante en mezclas bituminosas

Tipo de capa	Tipo de Mezcla	Dotación mínima (% en masa sobre el total de la mezcla bituminosa incluido polvo mineral)
Rodadura	Densa y Semidensa	4,5
Intermedia	Densa y semidensa	4
	Alto módulo	4,5
Base	Semidensa y gruesa	4
	Alto módulo	4,75



Es necesario tener en cuenta que para áridos con densidad diferente a $2,65\text{g/cm}^3$, los contenidos mínimos de ligante se deberán de corregir de la siguiente manera:

$$\alpha = 2,65/\rho_a$$

$$\text{Dot. mínima corregida} = \text{Dot. Min} \cdot \alpha$$

La relación ponderal recomendable entre el polvo mineral y el ligante hidrocarbonado en función del tipo de capa y la zona térmica se indica en la tabla 16.

Tabla 16: Relación ponderal polvo mineral-ligante

Tipo de capa	Zona térmica estival	
	Cálida y media	Templada
Rodadura	1,2	1,1
Intermedia	1,1	1,0
Base	1,0	0,9



9 Normativa para la aplicación de mezclas bituminosas.

A nivel nacional, las características constructivas de carreteras y puentes se basan en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (a partir de ahora citado en el documento como PG-3)³³ basado en la Orden FOM/2523/2014 de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos.

En este documento se recogen los materiales necesarios para la construcción de firmes y pavimentos, así como la señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos. Dentro del marco del proyecto, los artículos que comprenden una mayor relevancia a la hora de su estudio son:

- Artículo 211: Betunes asfálticos.
- Artículo 542: Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso.

A lo largo del PG-3 se establecen características de los materiales que vendrán determinados por las siguientes normas europeas:

Tabla 17 : Normativa aplicable a ensayos de mezclas bituminosas

Norma UNE	Descripción
UNE-EN 58	Betunes y ligantes bituminosos. Toma de muestras de ligantes bituminosos.
UNE-EN 1426	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja.
UNE-EN 1427	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola.
UNE-EN 12591	Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de betunes para pavimentación.
UNE-EN 12592	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la solubilidad.
UNE-EN 12593	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de



	fragilidad Fraass.
UNE-EN 12597	Betunes y ligantes bituminosos. Terminología.
UNE-EN 12607	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire.
UNE-EN 13924	Betunes y ligantes bituminosos.
UNE-EN ISO 2592	Determinación de los puntos de inflamación y de combustión. Método Cleveland en vaso abierto.
NLT-330	Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en pavimentos de carreteras.
NLT-382	Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte.
UNE 41201 IN	Características superficiales de carreteras y aeropuertos. Procedimiento para determinar la resistencia al deslizamiento de la superficie de un pavimento a través de la medición del coeficiente de rozamiento transversal (CRTS): SCRIM.
UNE-EN 932	Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos.
UNE-EN 933	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
UNE-EN 1097	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
UNE-EN 1367	Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos.
UNE-EN 12697	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente.
UNE-EN 13036	Características superficiales de carreteras y aeropuertos. Métodos de ensayo.
UNE-EN 13108-1	Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso.
UNE-EN 13108-20	Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 20: Ensayos de tipo.
UNE-EN 13108-21	Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 21: Control de producción en fábrica.



10 Empleo de escorias siderúrgicas en mezclas bituminosas

Se ha planteado el uso de las escorias procedentes del proceso de acería en mezclas bituminosas con el fin de mitigar el efecto de hinchamiento debido a la hidratación de la cal libre. De esta manera, se elimina uno de los factores claves en el empleo de este tipo de escorias para su empleo en construcciones.

Este acercamiento se basa en el principio de aislamiento de las partículas de las escorias con una capa circundante de betún que impedirá la penetración del agua en el agregado de escorias y su posterior reacción de expansión volumétrica por la hidratación de la cal libre presente en las escorias.

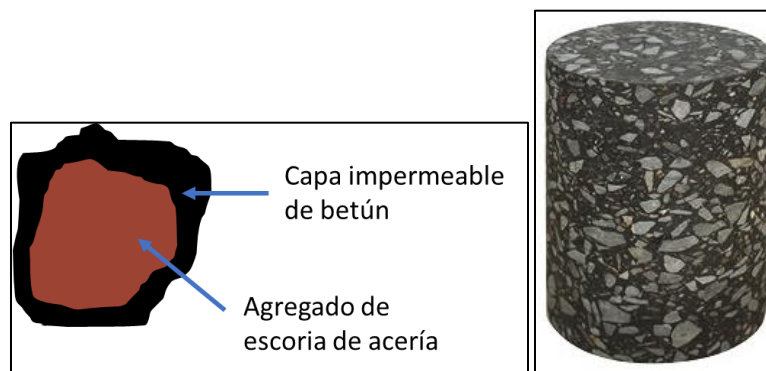


Figura 25: Principio de interacción escorias-betún

FUENTE: izquierda -propia y derecha: <http://www.controls-group.com/eng/asphaltbituminous-mixture-testing-equipment/core-drilling-machine-korbit .php>

El empleo de los áridos en mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso viene restringido nuevamente por el PG-3. En él se indica específicamente que el origen de los áridos a emplear en mezclas bituminosas puede ser natural o artificial siempre un cuando se cumplan con los requisitos técnicos requeridos.

Dependiendo de la capa en la que se emplee la mezcla bituminosa, las características del árido serán menos restrictivas, pudiendo incluso llegarse a utilizar materiales en una capa mientras que en otra no.



El PG-3 establece las siguientes características restrictivas en cuanto al uso de áridos gruesos en mezclas bituminosas:

- Angulosidad.
- Forma.
- Resistencia a la fragmentación.
- Resistencia al pulimento para capas de rodadura.
- Limpieza.

En las siguientes secciones, se describirá cada una de ellas comparándolas además con las características de las escorias generadas durante el proceso de acería.

10.1 Angulosidad (porcentaje de caras de fractura)

La angulosidad del material viene determinada por el porcentaje de partículas trituradas y redondeadas. Las dos proporciones se determinan mediante la norma UNE-EN 933-5:1999. Para ello se parte de una masa inicial de material que será tamizado en diferentes fracciones granulométricas. Posteriormente se separarán manualmente las partículas trituradas, totalmente trituradas, redondeadas y totalmente redondeadas. De esta manera se conocerán los porcentajes de cada una de ellas.

Tabla 18: Límites de partículas parcialmente trituradas en áridos

Proporción partículas parcialmente trituradas					
Capa	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	100			≥ 90	≥ 70
Intermedia					≥ 70
Base	100		≥ 90	≥ 70	



Tabla 19: Límites de partículas parcialmente trituradas en áridos

Proporción partículas totalmente redondeadas					
Capa	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	0			≤ 1	≤ 10
Intermedia					≤ 10
Base	0		≤ 1	≤ 10	

En los ensayos realizados se ha determinado que la proporción de partículas totalmente trituradas es del 100%. Este valor a pesar de ser ligeramente subjetivo ya que depende de la visión del técnico se corrobora con el hecho de que las escorias de acería, al proceder de etapas de machaqueo y cribado presentan en su totalidad partículas trituradas.

De esta manera, las escorias cumplirían la propiedad estudiada.



Figura 26: Detalle de forma de caras en las escorias de acería.

10.2 Forma (índice de lajas)

El índice de lajas vendrá determinado por un cribado de una determinada fracción granulométrica en un tamiz de barras paralelas cuya separación es la mitad del tamaño más grande de la fracción granulométrica según se especifica en la norma UNE 933-3.



El índice de lascas viene determinado por el cociente entre la suma de las masas de las fracciones granulométricas entre la suma de las masas de las partículas de cada fracción granulométrica que pasan por los tamices de barras correspondientes.



Figura 27: Separación del material por tamices de barras

M_1 : suma de las masas de las fracciones granulométricas d/D

M_2 : Suma de las masas de las partículas de cada fracción granulométrica que pasan por los tamices de barras correspondientes con separación $D/2$.

$$IL = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100$$

Tabla 20: Límites en el índice de lascas para áridos

Índice de lascas (Flakiness Index -FI)			
T00	T0 -T31	T32 y arcenes	T4
≤ 20	≤ 25	≤ 30	

En el caso de las escorias de acería, el valor del índice de lascas es considerablemente inferior al requerido. Un valor de índice de lascas para las escorias de acería podría ser del 2%³⁵.



10.3 Resistencia a la fragmentación (coeficiente de Los Ángeles)

La resistencia a la fragmentación por el método del ensayo de Los Ángeles viene determinada por la norma de referencia UNE-EN 1097-2.

Para determinar el coeficiente, se ha de partir de una fracción granulométrica determinada (establecida en la norma). La cantidad de material ensayado será de 5000 g. Este material será sometido a una molienda mediante un molino de bolas, haciéndolo girar 500 vueltas a velocidad constante. La masa retenida por el tamiz de 1,6 mm siendo el parámetro “m”.

El coeficiente de Los Ángeles vendrá dado por³⁶:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$



Figura 28: Detalle de equipamiento para realizar en ensayo de Los Angeles

FUENTE: <http://www.pavementinteractive.org/los-angeles-abrasion/>



Tabla 21: Límites de coeficiente de Los Angeles para áridos en mezclas bituminosas

Coeficiente de los Ángeles (LA)					
Capa	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	≤ 20			≤ 25	
Intermedia	≤ 25				≤ 25
Base	≤ 25		≤ 30		

En el caso de las escorias de acería estos valores son notablemente inferiores a los requeridos por normativa llegando incluso hasta valores de coeficientes de Los Angeles de 11,30³⁷.

10.4 Resistencia al pulimento para capas de rodadura (coeficiente de pulimento acelerado)

La determinación de este coeficiente se obtiene por la norma UNE-EN 1097-8. Para ello será necesario una máquina para la determinación del Pulimento Acelerado, así como un dispositivo de medición y fricción (Péndulo de fricción).



Figura 29: Máquina empleada para determinar el CPA

FUENTE: <http://www.controls-group.com/eng/aggregates-testing-equipment/accelerated-polishing-machine-psv.php>

Los valores límite de este índice para cada una de las respectivas capas del pavimento serán las siguientes:



Tabla 22: Límites de coeficiente de pulimento acelerado en áridos de mezclas bituminosas

Categoría de tráfico	Coficiente de pulimento acelerado (CPA) Polished Stone Value (PSV)
T00 y T0	≥ 56
T0 a T31	≥ 50
T32, T4 y arcenes	≥ 44

Según diversos estudios bibliográficos el coeficiente de pulimento acelerado de las escorias de acería resulta mayor al valor de 56 por lo que estas escorias podrían emplearse hasta en las vías con mayores exigencias técnicas³⁸.

Este valor deberá de ser controlado ya que es un valor fundamental a la hora de su aplicación en las diferentes vías

10.5 Limpieza (contenido de impurezas)

El contenido en impureza se determinará mediante el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 933-1 por el cual se determinará el porcentaje que pasa por el tamiz de 0,063 (porcentaje de finos).

Independientemente del tipo de capa a emplear, este valor será menor al 5 por mil (<5 ‰)

En el caso de las escorias de acería, al proceder de una etapa de machaqueo y cribado, se entiende que si el tamaño de tamiz inferior es superior al 0,063 mm el contenido en impurezas de las escorias únicamente queda restringido al que pudiese que dar adherido en los agregados de árido.

Si el árido a emplear cumple con cada una de las características indicadas anteriormente, este podrá emplearse como árido grueso en la aplicación de mezclas bituminosas teniendo en cuenta la normativa española.



Como estudio adicional, se han ensayado algunas de las características de las escorias que podrían ser relevantes a la hora de su aplicación en mezclas bituminosas, sobre todo teniendo en cuenta el posible rendimiento de la escoria en estas mezclas.

10.6 Expansividad

En necesario destacar que la normativa española (PG-3) no especifica en ningún momento, limitación con respecto a la expansividad del material a emplear en este tipo de mezclas bituminosas.

A pesar de ello la norma UNE-EN 13043:2013 establece las características de los agregados para mezclas bituminosas en las que se incluye la clasificación de los áridos teniendo en cuenta la estabilidad volumétrica de los áridos siderúrgicos. La categoría de los áridos se establece de la siguiente manera:

Expansión % volumen	Categoría V
$\leq 3,5$	V _{3,5}
$\leq 6,5$	V _{6,5}
≤ 10	V ₁₀
> 10	V _{Declarado}
Sin requisitos	V _{NR}

Por tanto, la expansividad de la escoria no está limitada por normativa sino por los límites operativos que establezcan las asfalteras en su uso.

De esta manera, el empleo de las escorias de acería como agregado para mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso sería factible.



10.7 Densidad

Finalmente, además se ha realizado una determinación de densidad de las escorias de acería según describe la norma UNE 13043³⁹ (Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas). Se ha llevado a cabo esta comprobación ya que una de las principales diferencias de las escorias de acería frente a otros agregados naturales es su mayor densidad. Para ello se empleó:

- Picnómetro de 50mL
- Estufa
- Balanza de precisión
- Desecador

El procedimiento para la determinación de la densidad ha sido el siguiente:

- 1) Secado de la muestra a 110°C.
- 2) Enfriamiento de la muestra en el desecador.
- 3) Pesado de picnómetro y adición de 10 gramos de muestra seca.
- 4) Adición de agua destilada hasta llenar el picnómetro. Se agita la muestra con el din de eliminar el aire adherido y se vuelve a rellenar el picnómetro.
- 5) Pesado del picnómetro
- 6) Vaciado del picnómetro y relleno con agua destilada.
- 7) Pesado del picnómetro únicamente con agua destilada.

Teniendo en cuenta los datos, se procede a calcular la densidad del sólido. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Test	Densidad aparente	Media
1	3330 kg/m ³	3390 kg/m ³
2	3450 kg/m ³	

Como se puede observar la densidad de las escorias es mucho mayor a la de un agregado natural que posee valores en torno a loa 1200-2500 kg/m³.



10.8 Dureza de las partículas

Con el fin de estudiar la dureza de las partículas, se ha seguido la norma UNE 13043 – que describe este procedimiento. Los resultados obtenidos delimitarán si la dureza es superior o inferior a 6 en la escala de Mohs. Con el fin de determinar esta característica, es necesario únicamente un microscopio de 10 aumentos y un portaobjetos.

El procedimiento sería el siguiente:

- 1) Observación de diferentes granos que existan en la muestra
- 2) Colocar los granos entre do placas portaobjetos, y aplicando presión deslizar una placa sobre la otra durante 10 segundos.
- 3) Examinación de la superficie de las placas.

De esta manera, si las placas se encuentran deterioradas (arañas) se establecerá que mínimo la dureza será de 6. Teniendo en cuenta la escoria de acería, el resultado ha sido el siguiente:

Tabla 23: Resultado ensayo de dureza

Material	Dureza Mohs
Escoria de acería	>6

Tabla 24: Tabla de valores Mohs

Dureza Mohs	Mineral	Descripción	Composición
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más facilidad	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre	$CaCO_3$
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo de acero	CaF_2
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$Ca_5(PO_4)_3(OH-, Cl-F-)$
6	Ortoclasa	Se puede rayar con una lija de acero	$KAlSi_3O_8$
7	Cuarzo	Raya el vidrio	SiO_2
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de wolframio	$Al_2SiO_4(OH-, F-)_2$
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de silicio	Al_2O_3
10	Diamante	Rayado solo por diamante	C



Como se puede observar, una dureza >6 establece que la escoria de acería es al menos igual de dura que la Ortoclasa. A partir de esta escala de dureza, los minerales poseen un contenido en sílice, elemento caracterizado por su dureza. Esta propiedad de la sílice se observa comúnmente en entornos industriales ya que produce problemas de erosión en tuberías o bombas cuando es transportado en un fluido.

10.9 Humedad

Con el fin de proporcionar una calidad de material adecuado a las asfalteras, además de optimizar los costes de transporte, es necesario determinar la humedad del material. Para ello, se seguirá el procedimiento establecido según la normativa UNE EN 13043.

Esta norma establece que la humedad del material se determinará por diferencia de pesajes de una muestra tal cual y la misma muestra secada en estufa a 110°C . En el caso de la escoria de acería, los valores obtenidos han sido los siguientes:

Tabla 25: Humedad de la escoria de acería

Material	Temperatura de secado	Humedad (%)	Media (%)
Escoria de acería	110°C	2,38	2,62
		2,85	

Como se puede observar, el contenido en humedad de este material es muy bajo. Esto permitirá tanto un transporte óptimo del material, así como influenciar de manera poco significativa el proceso industrial de las asfalteras.

10.10 Cloruros solubles en agua y conductividad

A pesar de teóricamente las escorias serían envueltas por una capa impermeable de betún, se ha realizado el ensayo establecido en la UNE 13043 para la determinación de cloruros solubles en agua. Se ha llevado este ensayo ya que las sales contaminantes más comunes son los cloruros sulfatos y nitratos. Este tipo de solución promueven la generación de reacciones corrosivas.



Con el fin de determinar esta característica, se empleará agua de pureza 3, ácido sulfúrico al 96% y nitrato de plata 0,01 molar. Además, como equipo de laboratorio además de útiles habituales, será necesario un equipo de valoración amperométrica.

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- 1) Pesaje de 100 g de muestra en un matraz de 250 ml
- 2) Adición de 100 ml de agua, se agita durante 5 minutos y se deja reposar 1 hora.
- 3) Agitación durante 5 minutos y filtración de la solución.
- 4) Obtención de 25 ml de solución, adición de 0,1 ml de ácido sulfúrico y dilución hasta 75 ml.
- 5) Valoración de la solución con nitrato de plata.

Los resultados han sido los siguientes:

Tabla 26: Determinación de cloruros solubles en agua

Material	Cloruros solubles (% en masa)	Media (% en masa)
Escoria de acería	0,0000	0,0000
	0,0000	

A la vista de los resultados, se observa que no existe ningún tipo de influencia de las escorias en cuanto a cloruros solubles en agua.

Además de la prueba de cloruros solubles en agua, y aprovechando que el procedimiento de laboratorio es análogo al de cloruros solubles en agua excepto en la etapa de valoración (adición de ácido sulfúrico y nitrato de plata) se procedió a realizar un ensayo de conductividad.

Para este ensayo se siguió la norma ISO 11127-6 que establece la medición de la conductividad de la solución anteriormente preparada mediante un puente conductimétrico o célula de conductividad. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 27.



Tabla 27: Conductividad eléctrica en escorias de acería

Material	Conductividad (mS/m)	Media
Escoria de acería	734	721
	707	

Como se puede observar, para las escorias de acería, existe un incremento en la conductividad eléctrica del agua por lo que será un factor a tener en cuenta en futuros ensayos.

10.11 Comparativa con otros agregados empleados

Según un estudio publicado en noviembre de 2011 por la universidad de Taiwán⁴⁰, se compararon las propiedades de una escoria modificada mediante un tratamiento de enfriamiento para su uso en carreteras. Las características se compararon con un agregado granítico, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 28: Comparación de escorias de acería BOF con un agregado granítico

Agregado	Peso específico	Absorción de agua	Abrasión Los Ángeles	Índice de lajas (por encima 1:3)	Caras de fractura (3 o más)
Escoria BOF	3,40	2,61%	13,24%	0,9%	96,20%
Árido granítico natural	2,61	1,76%	24%	9,8%	54,30%

De lo que se deduce que las escorias BOF presentan una estructura más porosa, posee menores valores en el ensayo de resistencia de los Ángeles, menor índice de lajas y una mayor proporción de caras de fracturas. Por tanto, este tipo de escorias presenta unas características muy interesantes para este tipo de aplicación.

A modo de resumen, las características de las escorias en comparación con otros materiales que son empleados en la construcción de carreteras se presentan a continuación:



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

Tabla 29: Comparativa de escorias de acería con otros agregados naturales⁴¹

Características	Escorias BOF	Granito	Grava
Densidad específica g/cm ³	3,3	2,5	2,6
Forma % de partículas alargadas y finas	<10	<10	<10
Valor de impacto (% peso)			
Valor de trituración (% peso)			
Coefficiente de pulimiento acelerado	58	48	45
Absorción de agua (% peso)	1	<0,5	<0,5
Resistencia al hielo-deshielo (% peso)	<0,5	<0,5	<1
Adhesión del ligante (%)	>90	>90	>85



11 Mercado potencial de las escorias de acería en España

11.1 Rango de comercialización

Inicialmente se ha de tener en cuenta que el único suministrador posible de escorias de acería en España es ArcelorMittal ya que es la única siderúrgica integral que posee 2 acerías-LD. Las acerías están tienen dos localizaciones diferentes, una situada en Veriña (Gijón) y la otra situada en Avilés.

Es importante destacar este punto, ya que al igual que en la industria de las canteras el agregado es un material con bajo valor añadido y su comercialización se ve restringida por los costes de transporte.

Asumiendo un valor de mercado para las escorias de acería similar al agregado natural, es decir, teniendo en cuenta que el precio de mercado es aproximadamente 6 €/t^{42} . El radio límite de distribución de material será similar al de las canteras, es decir unos 60 km.

Teniendo en cuenta lo anterior, en las siguientes dos figuras se muestran los límites de comercialización de las escorias de acerías para tanto la acería de Avilés como la de Gijón.



Figura 30: Límite de comercialización de la escoria de la acería de Veriña



Figura 31: Límite de comercialización de la escoria de acería de Avilés

Como se puede observar, el área cubierta por los 60 km distancia de las dos factorías. (límite de transporte del material) abarca la mayor parte de la comunidad autónoma incluyendo en él, el núcleo de mayor actividad de la región donde se sitúan la mayor parte de las empresas (incluidas asfalteras) por lo que, con el fin de simplificar las suposiciones de cálculo, se considerará la provincia del Principado de Asturias como la región potencial para el suministro de las escorias de acería.

11.2 Tendencia en la construcción de nuevos de viales

Según los datos publicados por el Ministerio de fomento, la evolución de construcción de carreteras en Asturias y España a lo largo de los últimos años se muestra a continuación⁴³:

Tabla 30: Evolución de los kilómetros totales de carreteras

Año	Km totales de carreteras en Asturias	Km totales de carreteras en España
2016	5043	165483
2015	5051	166003
2014	5052	166284
2013	5041	165361
2012	5007	165595
2011	5003	165907

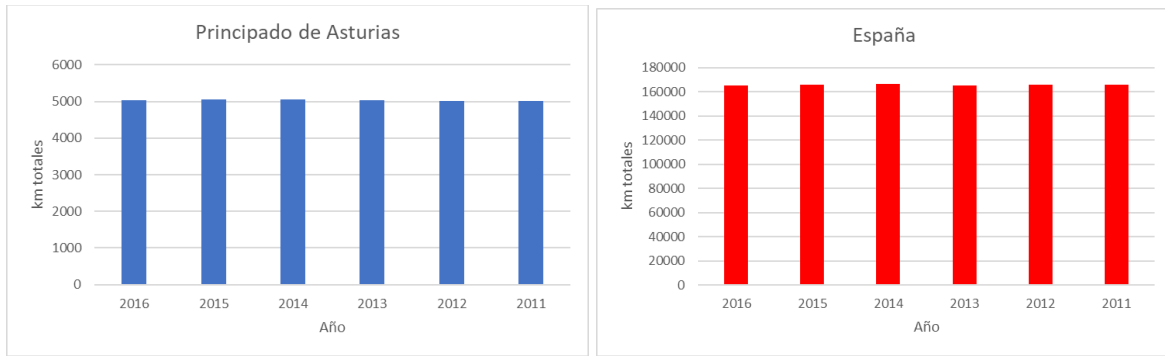


Figura 32: Evolución de los km totales de carreteras

A la vista de los datos anteriores, se concluye que la construcción de nuevos kilómetros de carretera tanto en el principado de Asturias como en España no ha supuesto una evolución significativa, manteniéndose valores muy semejantes.

En Asturias, la construcción de nuevas carreteras en los últimos seis años no ha supuesto más de 50 km por lo que se puede concluir que actualmente el este mercado se encuentra bloqueado por la escasez de demanda de nuevos kilómetros en vías.

Teniendo en cuenta esto, el incremento de carreteras medio anual en el Principado de Asturias durante los últimos 6 años supondría unos 7 km anuales de viales nuevos al año.

11.3 Tendencia de renovación de pavimentos en vías construidas

Con el fin de llevar a cabo una estimación anual de los kilómetros de pavimento renovados en Asturias, se ha recurrido a conocer las licitaciones de obras en los últimos 3 años promovidas por el Principado de Asturias. Es importante resaltar que estos valores podrían incrementarse ya que existen viales privados que requieren de mantenimiento. Debido a la escasez de información sobre esta práctica únicamente se han considerado las renovaciones licitadas por el Principado de Asturias.



A continuación, se presentan las obras adjudicadas de la renovación de pavimentos en Asturias de los tres últimos años a cargo de la Administración del Principado de Asturias⁴⁴.

Tabla 31: Licitaciones de renovación de pavimentos años 2017-2015

Tramo	Distancia Aprox.(km)	Presupuesto base licitación	Año licitación
AS-15: PK34+200 a PK 57+500	38	1.247.932,96 €	2017
AS-117: PK4+800 a PK 19+700	15	1.238.889,23 €	2017
As 112: Ujo -Corigos // Moreda Corigos	12,6	391.891,00 €	2017
AS-257: Colunga-Venta del pobre por lastres tramo Colunga-Lastres	10	204.064,33 €	2017
Cñ-4: Carretera ortiguera	3	130.450,71 €	2017
CÑ-3: El Espin - Folgueras (Coaña)	2,2	101.105,31 €	2017
CÑ-5: Torce, (Coaña)	1	99.082,40 €	2017
CO-4: Covadonga -los lagos y Cangas de Onís	13	803.315,32 €	2017
Renovación de pavimento de pantalanes en Puerto de Ribadesella	---	165.925,01 €	2017
AS-35: Villayón-Boal	33,6	130.154,29 €	2017
LV-8: San pedro de Villoria-Les Quintales y el Meruxal (Laviana)	5	456.409,87 €	2017
El Fresno-La Caridad (Grado)	4	126.078,62 € (IVA excluido)	2017
AS-357: Nava- Alto de la Campa (17/039/CA-OB)	10	348.322,33 €	2017
AS-350: Piedrafita- Bárcena del Monasterio (Tineo)	10	578.501,81 €	2016
Vial de acceso a Llandecarballo (GRANDAS DE SALIME)	0,5	62.501,52 € (IVA excluido)	2016
SI-5: Colloto-Moreo (Siero)	1,5	85.190,74 €	2016
CO-3: Carretera de Perlleces (Cangas de Onís)	1	247.570,84 €	2016
vv-14: Carretera de Miravalles (Villaviciosa)	--	140.661,33 €	2016
AS-15: Cornellana-Central de la barca	23	661.154,59 €	2016



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

AS-261: Puente de los Grazos-Beleño	18	495.642,30 €	2016
AS-27: Alto de la Garganta- Límite con Galicia por Santa Eulalia de Oscos	18	552.851,41 €	2016
AS-117: Riaño-Puerto de Tarna (pp.kk. 4+800 y 19+700)	15	382.189,61 €	2016
AS-11: Vegadeo- Alto de la Garganta (Vegadeo y Villanueva de Oscos)	18	123.964,43 €	2016
Travesías de Candás, concejo de Carreño	----	222.621,35 €	2016
Camino de Fresnedo a la Sierra (Cabranes)	10	118.569,86 € (IVA excluido)	2016
LL-3: Lugo de Llanera-Polígono de Silvota	1	243.491,27 € IVA excluido	2016
CN-5: carretera de Onón (Cangas de Narcea)	5	371.891,86 €, IVA excluido	2015
SL-5: La Peña- Las Centiniegas (Salas)	13	402.214,50 €, IVA excluido	2015
Vial Arredondas - Alto del Couzogordo	5	96.161,61 € (IVA excluido)	2015
LV-6: Condado-Ferrera y Aldea (Laviana).	3	289.243,93 € IVA excluido	2015
AS-110: Candás-Tabaza	10	571.666,69 € IVA excluido	2015
AS-115: Posada de Llanes-Robellada	15	826.397,06 € IVA excluido	2015
PI-6: Infiesto -Valles y reparación en P.K. 6+700	6	534.777,94€, IVA excluido	2015
AS-222: San Martín de Luiña - Brieves	30	245.490,06 € IVA excluido	2015
AS-255: tramo antiguo de Villaviciosa- Infiesto	21	124.479,75 € IVA excluido	2015
PI-9: Pintueles-Valloval (Piloña)	5	206.088,04 € IVA excluido	2015
AS-111: Langreo-Mieres	15	541.338,53 €, IVA excluido	2015
AS-216: La Espina-Tineo	19	495.798,56 €, IVA excluido	2015



Teniendo en cuenta los datos anteriores, durante los 3 últimos años, los kilómetros aproximados en los que se ha renovado el pavimento serían:

Tabla 32: Kilómetros renovados en Asturias en los últimos 3 años

Año	Longitud de viales renovado
2017	146 km
2016	107 km
2015	147 km

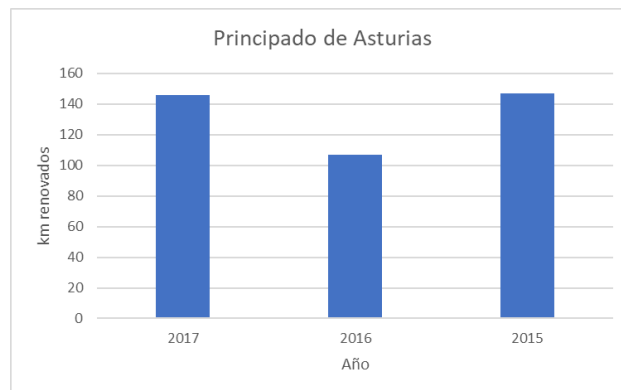


Figura 33: Km de pavimento renovados anualmente por la Administración de Asturias

Por tanto, tomando como referencia estos valores, la demanda anual de renovación de kilómetros en el principado de Asturias se sitúa en torno a los 130 km anuales.

11.4 Requerimiento de escorias en mezclas bituminosas

A continuación, se procederá a estimar la cantidad de escoria requerida por metro lineal en las mezclas bituminosas empleadas para la construcción o renovación de carreteras.

Para proceder con los cálculos se realizará la siguiente asunción:

“Se asume un ancho medio de vial de 8 metros (4m+4m) ya que 4m es el ancho mínimo que debe poseer un carril y que las carreteras estudiadas poseen tráfico en ambos sentidos.”



Como se ha explicado anteriormente en el documento, las mezclas bituminosas constan principalmente de los siguientes componentes:

- Ligante bituminoso
- Árido
- Polvo mineral

Debido a esto, en un volumen determinado a construir, existirán otros dos componentes además de los áridos. Además, el PG-3 establece un porcentaje de huecos según la capa de mezcla bituminosas.

11.4.1 Volumen a construir

Con el fin de considerar el volumen requerido por kilómetro lineal, se dividirá según las 3 diferentes capas ya que poseen necesidades constructivas diferentes. De esta manera, el volumen total será:

$$V_{total} = V_{rodadura} + V_{intermedia} + V_{base}$$

Estos volúmenes se calcularán a continuación teniendo en cuenta los espesores de capas establecidos en el PG-3.

Determinación del volumen de la capa de rodadura:

El PG-3, sección 542.3 establece que el espesor de la capa de rodadura variará entre 4 y 5 centímetros, por lo que se tomará un valor medio de 4,5 cm para esta capa. Teniendo en cuenta lo anterior, el volumen destinado a esta capa será de:

$$V_{rodadura} = ancho\ vial \cdot espesor\ de\ capa \cdot 1\ km$$

$$V_{rodadura} = 8\ m \cdot 0,045\ m \cdot 1000\ m = 360 \frac{m^3}{km\ via}$$



Determinación del volumen de la capa intermedia

De igual manera que el apartado anterior, el PG-3, sección 542.3 establece que el espesor de la capa intermedia variará entre 5 y 10 centímetros, por lo que se tomará un valor medio de 7,5 cm para esta capa. Teniendo en cuenta lo anterior, el volumen destinado a esta capa será de:

$$V_{intermedia} = ancho\ vial \cdot espesor\ de\ capa \cdot 1\ km$$

$$V_{intermedia} = 8\ m \cdot 0,075\ m \cdot 1000\ m = 600 \frac{m^3}{km\ via}$$

Determinación del volumen de la capa base

Finalmente, y análogamente a los dos apartados anteriores, el PG-3, sección 542.3 establece que el espesor de la capa base variará entre 7-15 centímetros, por lo que se tomará un valor medio de 11 cm para esta capa. Teniendo en cuenta lo anterior, el volumen destinado a esta capa será de:

$$V_{base} = ancho\ vial \cdot espesor\ de\ capa \cdot 1\ km$$

$$V_{base} = 8\ m \cdot 0,1\ m \cdot 1000\ m = 800 \frac{m^3}{km\ via}$$

De esta manera, el volumen total requerido por kilómetro de vía, teniendo en cuenta un espesor de hormigón bituminosos de 22 cm será:

$$V_{total} = 360 + 600 + 800 = 1760 \frac{m^3}{km\ via}$$

11.4.2 Requerimiento de escoria

Con el fin de estimar el requerimiento de la escoria, se deberá de tener en cuenta que el agregado no va a ocupar el 100% de la capa bituminosa como se ha explicado



anteriormente. Ya que las características de las capas varían ligeramente, se calculará el requerimiento de escorias teniendo en cuenta cada una de ellas.

En estos cálculos se considerará los siguientes parámetros establecidos por normativa según se indica en el PG-3:

- Porcentaje de huecos del hormigón/mezcla bituminosa.
- Dotación mínima de ligante hidrocarbonado.
- Relación ponderada polvo mineral - ligante

Escoria en capas de rodadura:

El porcentaje de huecos establecido por el PG-3 para capas de rodaduras varía entre el 3 y 6%. Estableciendo un valor medio de 5% de huecos, el porcentaje de mezcla bituminosa propiamente dicha en la capa de rodadura será del 95%. Por tanto:

$$V_{real-rodadura} = \left(1 - \frac{\% \text{ de huecos}}{100}\right) \cdot V_{rodadura} = 0,95 \cdot 360 = 342 \frac{m^3}{km \text{ via}}$$

La dotación mínima de ligante indicada en el PG-3, se establece en % en masa sobre el total. En el caso de capas de rodadura, este porcentaje se establece como el 4,5% sobre la masa total.

En el caso del polvo mineral se establece una relación polvo mineral-ligante de 1,1-1,2. Por lo que asumiendo un valor de 1,2 el porcentaje en masa sobre el total de la mezcla es de 5,4%.

Además, en este estudio se supondrá un caso más realista en el que la sustitución de las escorias no suponga el 100% del árido, sino 3 proporciones diferentes de áridos de los que se conoce que es posible su incorporación. Estas serán:

- 15% escoria de acería + 85% árido natural
- 25% escoria de acería + 75% árido natural



- 50% escoria de acería + 50 árido natural

Teniendo en cuenta todo lo anterior y asumiendo que las densidades con las que trabajaremos serán de:

$$\rho_{\text{ligante}} = 1100 \text{ kg/m}^3 \text{ }^{45}$$

$$\rho_{\text{polvo mineral}} \text{ y } \rho_{\text{agregado natural}} = 1450 \text{ kg/m}^3 \text{ }^{46}$$

$$\rho_{\text{escoria}} = 3000 \text{ kg/m}^3 \text{ (se toma como valor medio debido a la variabilidad del material).}$$

A continuación, se detallan las densidades calculadas del árido teniendo en cuenta las proporciones del árido siderúrgico y natural

Tabla 33: Densidades de mezcla de áridos

Composición del árido	Densidad de la mezcla de áridos
15 +85%	1682,5
25 +75%	1837,5
50+50%	2225

Por lo que la composición de la mezcla final en volumen será:

Tabla 34: Composición de la mezcla bituminosa (%vol.) para capas de rodadura

Composición del árido	Componente	% masa	Densidad kg/m ³	Ratio	Volumen total	% Volumen
15 +85%	Ligante	4,5	1100	0,26	1,17	3,01
	Polvo mineral	5,4	1450	0,34	1,85	4,76
	Árido	90,1	1682,5	0,40	35,82	92,23
25 +75%	Ligante	4,5	1100	0,25	1,13	2,78
	Polvo mineral	5,4	1450	0,33	1,78	4,39
	Árido	90,1	1837,5	0,42	37,73	92,83
50+50%	Ligante	4,5	1100	0,23	1,04	2,32
	Polvo mineral	5,4	1450	0,30	1,64	3,67
	Árido	90,1	2225,5	0,47	41,99	94,01



Por lo tanto, para las 3 mezclas diferentes los porcentajes en volumen del árido son 40, 42, 47% por lo que el porcentaje en volumen de las escorias será:

Tabla 35: Porcentajes de áridos en volumen respecto al total de la mezcla

Árido total	Componente	% masa	Densidad	ratio	Volumen	% Volumen	% Volumen total
92,23	Natural	85	1450	0,33	27,70	73,25	67,56
	Escoria	15	3000	0,67	10,11	26,75	24,67
92,83	Natural	75	1450	0,33	24,44	59,18	54,94
	Escoria	25	3000	0,67	16,85	40,82	43,97
94,01	Natural	50	1450	0,33	16,29	32,58	30,63
	Escoria	50	3000	0,67	33,71	67,42	63,38

Por lo que para el volumen y peso de las escorias por metro lineal para capas de rodadura será:

Tabla 36: Requerimientos de escoria en capas de rodadura

Mezcla áridos	Volumen capa real m ³ /km vía	% Volumen Escorias mezcla	Escorias m ³ /km vía	Cantidad escorias t/km vía
15-85	342	24,67	84,36	253,08
25-75	342	43,97	150,37	451,10
50-50	342	63,38	216,75	650,24

Escoria en capas intermedias:

Al igual que en las capas de rodadura, la cantidad de escorias que se pueden emplear por kilómetro de vía pueden calcularse teniendo en cuenta las características de las capas intermedias.



El porcentaje de huecos establecido por el PG-3 para capas intermedias varía entre el 4 y 7%. Estableciendo un valor medio de 6% de huecos, el porcentaje de mezcla bituminosa propiamente dicha en la capa de intermedia será del 94%. Por tanto:

$$V_{real-intermedia} = \left(1 - \frac{\% \text{ de huecos}}{100}\right) \cdot V_{rodadura} = 0,94 \cdot 600 = 564 \frac{m^3}{km \text{ via}}$$

La dotación mínima de ligante indicada en el PG-3, se establece en % en masa sobre el total. En el caso de capas intermedias, este porcentaje se establece en el rango del 4 al 4,5 sobre la masa total. Para este análisis se establecerá el valor de 4,25.

En el caso del polvo mineral se establece una relación polvo mineral-ligante de 1,1-1,0. Por lo que asumiendo un valor de 1,1 el porcentaje en masa sobre el total de la mezcla es de 5,94%.

De igual manera que en caso de las capas de rodadura, se estudiarán las mismas mezclas de áridos y se procederá al cálculo de requerimiento de escorias por kilómetro lineal. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Composición de la mezcla final en % de volumen:

Tabla 37: Composición (% vol.) de las mezclas bituminosas en capas intermedias

Composición del árido	Componente	% masa	Densidad kg/m ³	Ratio	Volumen total	% Volumen
15 +85%	Ligante	4,25	1100	0,26	1,10	2,84
	Polvo mineral	5,94	1450	0,34	2,03	5,24
	Árido	89,81	1682,5	0,40	35,70	91,92
25 +75%	Ligante	4,25	1100	0,25	1,07	2,62
	Polvo mineral	5,94	1450	0,33	1,96	4,83
	Árido	89,81	1837,5	0,42	37,61	92,55
50+50%	Ligante	4,25	1100	0,23	0,98	2,19
	Polvo mineral	5,94	1450	0,30	1,80	4,04
	Árido	89,81	2225,5	0,47	41,85	93,77



Por lo tanto, la cantidad de volumen de los dos tipos de áridos sobre la mezcla final será:

Tabla 38: % en volumen de áridos respecto a la mezcla total en capas intermedias

Árido total	Componente	% masa	Densidad	ratio	Volumen	% Volumen	% Volumen total
91,92	Natural	85	1450	0,33	27,70	73,25	67,33
	Escoria	15	3000	0,67	10,11	26,75	24,58
92,55	Natural	75	1450	0,33	24,44	59,18	54,77
	Escoria	25	3000	0,67	16,85	40,82	44,10
93,77	Natural	50	1450	0,33	16,29	32,58	30,55
	Escoria	50	3000	0,67	33,71	67,42	63,21

Tabla 39: Requerimientos de escorias calculados para capas intermedias

Mezcla áridos	Volumen real capa m ³ /vial	% Volumen Escorias mezcla	Escorias m ³ /km vial	Cantidad escorias t/km vial
15-85	564	24,58	138,65	415,96
25-75	564	44,10	248,74	746,22
50-50	564	63,21	356,52	1069,57

Escoria en capas base:

El porcentaje de huecos establecido por el PG-3 para capas base varía entre el 4 y 8%. Estableciendo un valor medio de 7% de huecos, el porcentaje de mezcla bituminosa propiamente dicha en la capa de intermedia será del 93. Por tanto:

$$V_{real-intermedia} = \left(1 - \frac{\% \text{ de huecos}}{100}\right) \cdot V_{rodadura} = 0,93 \cdot 800 = 744 \frac{m^3}{km \text{ via}}$$

En el caso de capas base la dotación mínima de ligante se establece en el rango del 4 al 4,75% sobre la masa total. Para este análisis se establecerá el 4,5%.

En el caso del polvo mineral se establece una relación polvo mineral-ligante de 9-1,0. Por lo que asumiendo un valor de 1 el porcentaje en masa sobre el total de la mezcla es de 4,5%.



Al igual que en los dos casos anteriores se estudiarán las mismas mezclas de áridos procediendo así al cálculo de requerimiento de escorias por kilómetro lineal de vía. A continuación, se muestran los resultados obtenidos

Tabla 40: Composición total mezcla bituminosa en capa base

Composición del árido	Componente	% masa	Densidad kg/m ³	Ratio	Volumen total	% Volumen
15 +85%	Ligante	4,5	1100	0,26	1,17	3,01
	Polvo mineral	4,5	1450	0,34	1,54	3,96
	Árido	91	1682,5	0,40	36,17	93,03
25 +75%	Ligante	4,5	1100	0,25	1,13	2,77
	Polvo mineral	4,5	1450	0,33	1,49	3,65
	Árido	91	1837,5	0,42	38,11	93,58
50+50%	Ligante	4,5	1100	0,23	1,04	2,31
	Polvo mineral	4,5	1450	0,30	1,37	3,05
	Árido	91	2225,5	0,47	42,41	94,64

Tabla 41: Cálculo del porcentaje de los 2 áridos sobre la mezcla total en capas base

Árido total	Componente	% masa	Densidad	ratio	Volumen	% Volumen	% Volumen sobre mezcla
93,03	Natural	85	1450	0,33	27,70	73,25	68,15
	Escoria	15	3000	0,67	10,11	26,75	24,88
93,58	Natural	75	1450	0,33	24,44	59,18	55,38
	Escoria	25	3000	0,67	16,85	40,82	43,62
94,64	Natural	50	1450	0,33	16,29	32,58	30,84
	Escoria	50	3000	0,67	33,71	67,42	63,80

Tabla 42: Escoria requerida en capas base según su proporción de mezcla

Mezcla áridos	Volumen capa m ³	% Volumen Escorias mezcla	Escorias m ³	Cantidad escorias (t)
15-85	744	24,88	185,12	555,35
25-75	744	43,62	324,51	973,54
50-50	744	63,80	474,68	1424,03



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

A modo de resumen se muestran a continuación los requerimientos de escoria por kilómetro lineal, teniendo en cuenta la capa de aplicación y el porcentaje de sustitución del árido convencional.

Tabla 43: Resumen cálculos de necesidades de escorias según su capa de aplicación y porcentaje de sustitución del árido

Tipo de capa	% De sustitución escoria/agregado	t de escoria por km de vía
Rodadura	15/85	253,08
	25/75	451,10
	50/50	650,24
Intermedia	15/85	415,96
	25/75	746,22
	50/50	1069,57
Base	15/85	555,35
	25/75	973,54
	50/50	1024,03



11.5 Mercado potencial

Una vez se ha obtenido la cantidad de kilómetros que requieren de la aplicación de nuevas capas bituminosas a lo largo de un año, 7km/año de viales nuevos y 130km/año de viales en los cuales se renueva el pavimento, se estima entonces que la demandad anual de km de vía a asfaltar es de aproximadamente 137 km/año teniendo en cuenta los cálculos y observaciones explicadas en las secciones 12.2 y 12.3.

De esta manera se suponen una serie de casos de aplicación de las escorias en las mezclas bituminosas.

- Supuesto 1: Aplicación de las escorias únicamente en la capa inferior.
- Supuesto 2: aplicación de las escorias en la capa intermedia.
- Supuesto 3: aplicación de las escorias en la capa de rodadura.
- Supuesto 4: aplicación de las escorias en las dos capas inferiores (intermedia + base).
- Supuesto 5: aplicación de las escorias en las dos capas superiores (rodadura +base).
- Supuesto 6: aplicación de las escorias en toda la mezcla bituminosa.

Teniendo en cuenta esto, a continuación, se muestra la demanda potencial de escorias anual para el Principado de Asturias si únicamente un 15 % de los áridos pudiesen ser sustituidos por escorias

Tabla 44: Mercado potencial para una sustitución del 15% de áridos por escorias

Supuesto	Km potenciales de asfalto	Capas de incorporación de escorias	Necesidad de escorias (t/km)	Consumo de escorias anual (t/año)
1	137	Base	555,35	76082,95
2	137	Intermedia	415,96	56986,52
3	137	Rodadura	253,08	34671,96
4	137	Base+ Intermedia	971,31	133069,47
5	137	Intermedia+ Rodadura	669,04	91658,48
6	137	Base+ Intermedia+ Rodadura	1224,39	167741,43



Si fuese posible la sustitución parcial del 25% de los áridos se obtendrían los siguientes resultados:

Tabla 45: Mercado potencial para una sustitución del 25% de áridos por escorias

Supuesto	Km potenciales de asfalto	Capas de incorporación de escorias	Necesidad de escorias (t/km)	Consumo de escorias anual (t/año)
1	137	Base	973,54	133374,98
2	137	Intermedia	746,22	102232,14
3	137	Rodadura	451,1	61800,7
4	137	Base+ Intermedia	1719,76	235607,12
5	137	Intermedia+ Rodadura	1197,32	164032,84
6	137	Base+ Intermedia+ Rodadura	2170,86	297407,82

Finalmente, si una sustitución mucho mayor a los casos anteriores fuese posible, se obtendrían las siguientes necesidades de mercado:

Tabla 46: Mercado potencial para una sustitución del 30% de áridos por escorias

Supuesto	Km potenciales de asfalto	Capas de incorporación de escorias	Necesidad de escorias (t/km)	Consumo de escorias anual
1	137	Base	1024,03	140292,11
2	137	Intermedia	1069,57	146531,09
3	137	Rodadura	650,24	89082,88
4	137	Base+ Intermedia	2093,6	286823,2
5	137	Intermedia+ Rodadura	1719,81	235613,97
6	137	Base+ Intermedia+ Rodadura	2743,84	375906,08



12 Siguientes pasos

Con el fin de corroborar el comportamiento de las escorias en mezclas bituminosas y la aplicabilidad de esta tecnología, se propone escalar las pruebas de mezclas bituminosas con escorias a un piloto.

Para ello sería necesario elegir un vial donde fuese conocido el tráfico habitual, así como las condiciones meteorológicas de la zona.

Posteriormente se realizaría un asfaltado de una zona diferenciado dos zonas claras:

- 1) Zona con hormigón bituminoso habitual.
- 2) Zona con hormigón bituminoso con contenido en escorias de acería.

Se ha presupuestado el coste de una construcción de un vial piloto siendo los costes de éste para la aplicación de unas 20 toneladas de material:

Tabla 47: Costes asociados a la construcción de un vial piloto

Medición Aprox.	Unidad	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
20	TN	Suministro, extendido y compactado de M.B.C. y materiales incluido betún y parte proporcional de emulsión para riego de imprimación	55,11	1.102,20
20	TN	Transporte	16,63	332,60
20	TN	Movimiento de maquinaria	9,77	195,40
20	TN	Mano de obra a repercutir por tonelada, jefe de equipo, maquinista extendedora, maquinista rodillo, maquinista rodillo mixto, chofer cuba, reglista y peón	62,83	1.256,60
			Total	2.886,80 € (IVA no incl.)



Además de la construcción del vial, sería necesario caracterizar tanto el material de entrada como realizar testigos a lo largo del tiempo con el fin de estudiar el comportamiento de estas escorias. De la misma manera, se obtenido un presupuesto realizado para ensayos teniendo en cuenta el material de entrada, la mezcla bituminosa y los testigos obtenidos

El presupuesto unitario de todos los ensayos se ofertó en 1668,90 €. A continuación, se detalla el desglose del presupuesto de cada uno de los ensayos:

Tabla 48: Costes asociados a los ensayos del árido en pruebas piloto

Ensayos áridos/escoria			
Descripción	Unidades	Precio	Importe
Determinación de la forma de las partículas: Índice de lajas, según UNE-EN 933-3:2012.	1	26,10	26,10
Análisis Granulométrico de una grava. para aglomerados/UNE-EN 933-1:2012.	1	21,60	21,60
Determinación de Caras de Fractura de áridos para aglomerados/ UNE EN 933/5:99	1	26,10	26,10
Determinación del coeficiente de pulido acelerado (C.P.A.), UNE 146130. UNE-EN 1097-8	1	474,30	474,30
Determinación de la adhesividad de los áridos gruesos, según normas NLT-166/92	1	43,20	43,20
Determinación del Coeficiente de limpieza, según Norma Anexo C .UNE 146130	1	18,90	18,90
Determinación de Desgaste Los Angeles según UNE-EN 1097-2:2010	1	54,00	54,00
Suma de importes		664,20 €	



Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

Tabla 49: Costes asociados a ensayos sobre la mezcla bituminosa en caliente en ensayo piloto

Ensayos sobre muestra en caliente			
Descripción	Unids.	Precio	Importe
Toma de una muestra de mezcla bituminosa en caliente, según UNE-EN12697-27:2001.	1	Sin cargo	Sin cargo
Contenido en ligante de una muestra de mezcla bituminosa en caliente por ignición, según UNE-EN 12697-39:2006.	1	48,60	48,60
Determinación de la granulometría de las partículas de una mezcla bituminosa en caliente, según norma UNE-EN 12697-2:2003+A1:2007.	1	21,60	21,60
Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático, densidad máxima por el procedimiento volumétrico, contenido de huecos, preparación de la muestra mediante compactador de impacto y ensayo Marshall; según UNE-EN 12697-6:2003+A1-2007, UNE-EN 12697-5:2009, UNE 12697-8:2003, UNE 12697-30:2006/A1:2007 y 12697-34:2004/A1:2007.	1	81,00	81,00
Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa en caliente, según UNE-EN 12697-12:2009 (Método A).	1	202,50	202,50
Determinación de la resistencia a las deformaciones plásticas, mediante el ensayo de rodadura en pista, según UNE EN 12697-22:2008+A1:2008.	1	360,00	360,00
Suma de importes			713,70 €



Tabla 50: Costes asociados a las probetas terminadas en los ensayos piloto

Ensayos sobre unidad terminada			
Descripción	Unids.	Precio	Importe
Extracción de testigos de mezclas bituminosas en caliente extendidas y compactadas, según apartado 4.7 de la UNE-EN 12697-27:2001, para la determinación de su densidad aparente por el método hidrostático, según UNE-EN 12697-6:2003+A1-2007 y de su espesor por el método destructivo, según UNE-EN 12697-36:2003	1	81,00	81,00
Medición de la profundidad de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método del círculo de arena, según UNE EN 13036-1:2002. (Mínimo 5 puntos por desplazamiento). Mínimo 5 uds.	1	15,00	15,00
Determinación de la resistencia al deslizamiento de un pavimento, s/NLT 175-98	1	135,00	135,00
Suma de importes		291,00 €	

Tabla 51: Resumen -costes de ensayos

RESUMEN (SIN IVA)	
1.- Ensayo árido/escoria	664,20 €
2.- Ensayos sobre muestra en caliente	713,70 €
3.- Ensayos sobre unidad terminada	291,00 €
TOTAL (SIN IVA)	1.668,90 €

De esta manera, podría llevarse a cabo una prueba del concepto desarrollado en el proyecto a escala piloto. Esta prueba determinaría el comportamiento de las escorias de acería en mezclas bituminosas en un tiempo prolongado y permitiría su estudio en mayor profundidad con el fin de validar la aplicación.



13 Conclusiones

- A pesar de que las escorias siderúrgicas se reciclan tanto interna como externamente, sus elevadas ratios de generación dificultan en gran medida su completo reciclado.
- Las escorias siderúrgicas generadas tanto en el horno alto con los convertidores y hornos de arco eléctrico suponen el 90% (en masa) de los subproductos generados en el proceso siderúrgico).
- Las escorias de acería poseen contenidos significativos en cal libre y magnesia que dificultan su valorización en aplicaciones constructivas que requieran de importante estabilidad volumétrica.
- La variabilidad química en los subproductos es un factor muy limitante a la hora de encontrar aplicaciones. Se requiere encontrar aplicaciones que sean capaces de admitir esta variabilidad.
- El concepto de escorias de acería engloba a tres tipos de escorias producidas: escorias de desulfuración, de convertidor y de metalurgia secundaria. Actualmente si no se encuentra una aplicación determinada para algún tipo en concreto no se produce una segregación de estos materiales y se mezclan.
- La aplicación de las escorias de acería en mezclas bituminosas podría ser factible debido a que las partículas de escoria se recubren de una película impermeable de betún que evitaría el contacto con agua y humedad, evitando así la reacción con la cal libre y magnesia y su consecuente hinchamiento.
- Teniendo en cuenta la información obtenida tanto de ensayos como en la bibliografía, las escorias de acería cumplen los requisitos actuales establecidos para los áridos que se quieran incorporar en mezclas tipo hormigón bituminoso (características definidas por el PG-3)
- El índice de pulimiento acelerado es un punto crítico en la valorización de este subproducto ya que las escorias siderúrgicas poseen valores mayores que los áridos habituales. De esta manera, las escorias siderúrgicas podrían sustituir áridos



comunes en aplicaciones más exigentes como en carreteras de categoría T00 en donde los áridos comunes no pueden utilizarse por este factor limitante.

- Otros parámetros no dictados por norma como la densidad, dureza de las partículas, humedad del material y cloruros disueltos han sido estudiados arrojando valores aceptables.
- La conductividad de las escorias ha de ser un factor para estudiar en futuras pruebas.
- Actualmente, y debido a la falta de experiencia, una sustitución completa de los áridos de una mezcla bituminosa no es factible. En este proyecto se estudiaron porcentajes de reemplazo de áridos por escoria del 15, 25 y 50% obteniéndose resultados muy interesantes.
- Debido a la escasez de acerías-LD en España, el mercado potencial de las escorias de acería LD queda restringido únicamente al principado de Asturias.
- Se ha estimado que si el 50% de árido fuese reemplazado por escorias en capas bituminosas se podrían llegar a consumir en el Principado de Asturias hasta aproximadamente 375 000 toneladas al año de este material. Porcentajes de reemplazo menores como el 15 o 25% obteniendo valores interesantes como 167 000 t/año y 297 000t/año respectivamente.
- La realización de unas pruebas piloto supondría la posibilidad de dar visibilidad a este tipo de subproductos industriales, así como de llevar a cabo ensayos a largo plazo en donde se comparen las características de una mezcla bituminosa habitual y una realizada con escorias de acería con el fin de validar la aplicación.



14 Bibliografía

1. Subproducto o Residuo según la Ley 22/2011 de 28 de Julio. *Gestión de residuos, tratamiento de suelos y aguas - Emgrisa* Available at: <http://www.emgrisa.es/publicaciones/subproducto-o-residuo/>. (Accessed: 8th July 2018)
2. The Circular Economy Concept - Regenerative Economy. Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/overview/concept>. (Accessed: 8th July 2018)
3. Informe 2013 sobre el RECICLAJE DEL ACERO en la Industria Siderúrgica Española. Available at: <https://unesid.org/iris2013/elacero.html>. (Accessed: 8th July 2018)
4. Equipo Técnico del Centro de Formación La Toba. *El Proceso Siderúrgico - ArcelorMittal*. (Grafinsa, 2007).
5. The electric arc furnace. *EEF* Available at: <https://www.eef.org.uk/uk-steel/news-blogs-and-publications/blogs/2017/mar/the-electric-arc-furnace>. (Accessed: 8th July 2018)
6. de Araújo, J. A. & Schalch, V. Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. *J. Mater. Res. Technol.* **3**, 274–279 (2014).
7. European slag association & The European Steel Association. Position paper on the status of ferrous slag. (2012).
8. Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural. Autorización Ambiental Integrada - ArcelorMittal factorías de Gijón y Avilés - AAI-022/06. (2018).
9. Lindström, D. A study on desulfurization of hot metal using different agents. (Industrial Engineering and Management, KTH Royal Institute of Technology, 2014).



10. Schrama, F. N. H., Beunder, E. M., Van den Berg, B., Yang, Y. & Boom, R. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmak. Steelmak.* **44**, 333–343 (2017).
11. Pato Altavilla. Metalurgia Secundaria. *Scribd* (2014). Available at: <https://es.scribd.com/presentation/238672529/Metalurgia-Secundaria>. (Accessed: 8th July 2018)
12. Jose Luis Enríquez Berciano & Enrique Tremps Guerra. Metalurgia Secundaria. (2007).
13. NIPPON SLAG ASSOCIATION. Types of iron and steel slag. Available at: <http://www.slg.jp/e/slag/kind.html>. (Accessed: 8th July 2018)
14. Yildirim, I. Z. & Prezzi, M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering* (2011). Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2011/463638/>. (Accessed: 8th July 2018)
15. Junior, P. *et al.* Characterization of basic oxygen furnace slag and granite waste mixtures to Portland cement production. *REM - Int. Eng. J.* **69**, 459–464 (2016).
16. Loncnar, M. *et al.* Study of the leaching behaviour of ladle slags by means of leaching tests combined with geochemical modelling and mineralogical investigations. *J. Hazard. Mater.* **317**, 147–157 (2016).
17. Sideris, K. K., Tassos, C., Chatzopoulos, A. & Manita, P. Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **170**, 660–667 (2018).
18. Gadsdon, B. & Han, X. G. Hot metal desulphurisation: Benefits of magnesium lime co-injection. *Iron Steel* **44**, 96–100 (2009).
19. Ho, C.-L., Huang, W.-L. & Wang, H.-Y. Study of the volume stability of slag cement mortar applied to desulfurization slag during high temperature operation. *Constr. Build. Mater.* **144**, 147–157 (2017).



20. Kuo, W.-T. & Hou, T.-C. Engineering properties of alkali-activated binders by use of desulfurization slag and GGBFS. *Constr. Build. Mater.* **66**, 229–234 (2014).
21. EUROSLAG. Ferrous slags properties. Available at: <http://www.euroslag.com/products/properties/>. (Accessed: 8th July 2018)
22. CEDEX. Escorias de acería LD. (2012).
23. Sasaki, T. & Hamazaki, T. Development of steam-aging process for steel slag. *Nippon Steel Sumitomo Met. Tech. Rep.* 23–26 (2015).
24. Kazutoshi Kanda, Shigeru Motisita & Takuji Hamasaki. Pressurized steam aging process for steel slag. (2013). Available at: http://www.seaisi.org/file/file_name_20130314092346_Session5%20Paper2.pdf. (Accessed: 8th July 2018)
25. Drissen, P., Ehrenberg, A., Kühn, M. & Mudersbach, D. Recent Development in Slag Treatment and Dust Recycling. *Steel Res. Int.* **80**, 737–745
26. World Steel Association. Fact sheet: steel industry by-products. (2018). Available at: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1b916a6d-06fd-4e84-b35d-c1d911d18df4/Fact_By-products_2018.pdf. (Accessed: 8th July 2018)
27. EUROSLAG. Euroslag statistics, Statistics 2010. (2010). Available at: <http://www.euroslag.com/researchlibrarydownloads/downloads/>. (Accessed: 8th July 2018)
28. Sollutia.com. Aplicaciones | CEDEX. Available at: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/26/escoria-de-aceria-ld/valorizacion/67/aplicaciones.html>. (Accessed: 8th July 2018)
29. Yi, H. *et al.* An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environ. Sci.* **16**, 791–801 (2012).



30. Guo, J., Bao, Y. & Wang, M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Manag.* **78**, 318–330 (2018).
31. Kazuhiro Horii, Naoto Tsutsumi, Yoshiyuki Kitano & Toshiaki Kato. Processing and reusing technologies for steelmaking slag. (2013). Available at: <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/104-20.pdf>. (Accessed: 8th July 2018)
32. UNESID. Actividad 2015 - Escorias Subproductos. Available at: <https://unesid.org/acero-y-sociedad-medio-ambiente-escorias.php>. (Accessed: 8th July 2018)
33. Ministerio de Fomento. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). (2014).
34. ASFALTOS DEL NALÓN - ASFALTO EN FRÍO - ASFALTO EN CALIENTE - ASTURIAS | Asfaltos del Nalón.
35. Viktors Haritonovs, Martins Zaumanis, Guntis Brencis & Juris Smirnovs. Research on the use of BOF steel slag aggregates with dolomite sand waste to develop high performance asphalt concrete. (2012).
36. Los Angeles Abrasion | Pavement Interactive. Available at: <http://www.pavementinteractive.org/los-angeles-abrasion/>. (Accessed: 8th July 2018)
37. Huang, L.-S. Evaluation of the Cooling and Pavement Performance of Basic Oxygen Furnace Slag Used in Asphalt Mixture. *Appl. Sci.* **7**, 1226 (2017).
38. John Emery. Steel slag utilization in asphalt mixes. (1984).
39. Norma UNE 13043 : Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas. (2004). Available at: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/UNE?c=N0032201>. (Accessed: 8th July 2018)



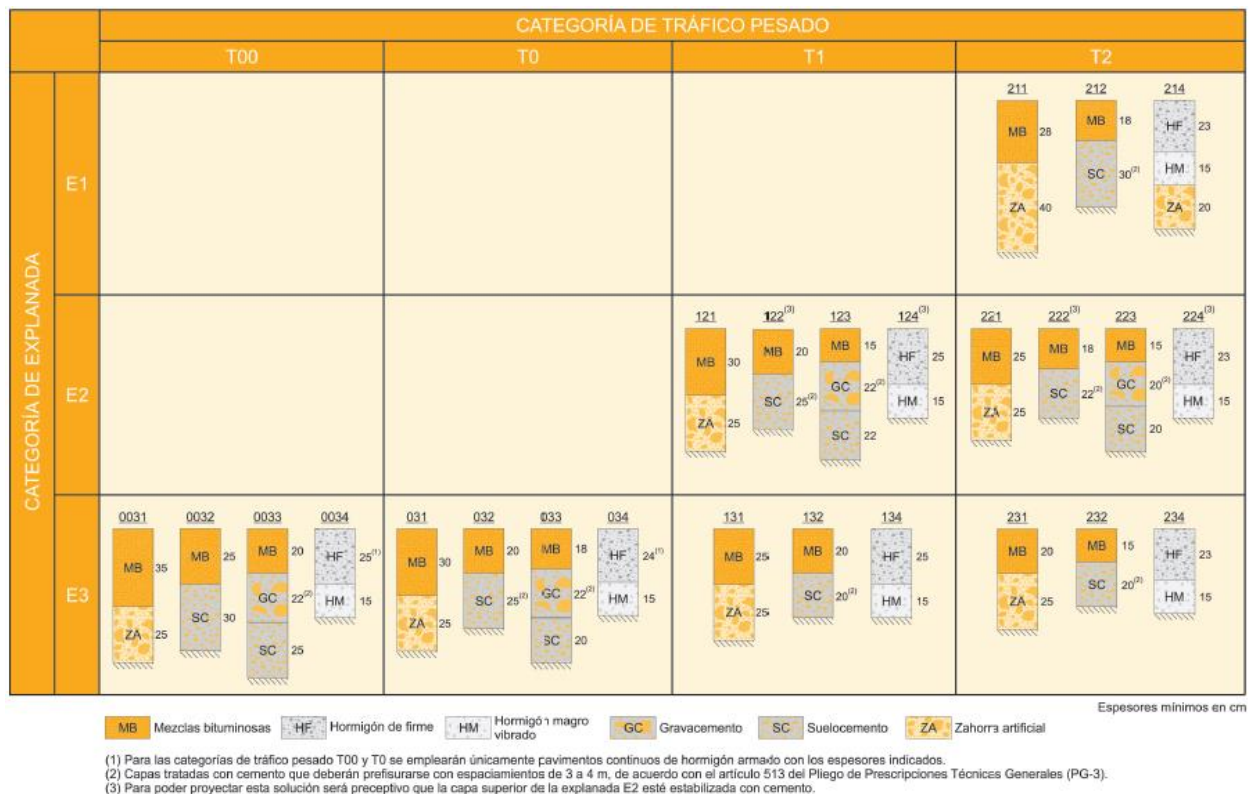
40. Long-Sheng Huang & Deng-Fong Lin. Influence of cooling efficiency of Basic Oxygen Furnace Slag used in recycled asphalt mixes. (2011).
41. Motz, H. & Geiseler, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Manag.* **21**, 285–293 (2001).
42. USGS Minerals Information: Aggregates Information. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aggregates/>. (Accessed: 8th July 2018)
43. Longitudes provinciales de todas las redes - Longitudes provinciales de todas las redes - Catálogo y evolución de la red de carreteras - Carreteras - Áreas de actividad - Ministerio de Fomento. Available at: https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/CATYEVO_RED_CARRETERAS/Long_prov_2011_2012/. (Accessed: 8th July 2018)
44. Resultados de la búsqueda de contratos - Gobierno del Principado de Asturias. Available at: https://sede.asturias.es/portal/site/Asturias/menuitem.2befbbd344d16782aea8c810100000f7/?pag=1&canal1=14af29c2c2391110VgnVCM1000000100007f____&i18n.http.lang=es&busqueda=pavimento&vgnnextoid=616a151b41991110VgnVCM1000000100007fRCRD&y=11&x=38. (Accessed: 8th July 2018)
45. DITECPESA. Ficha de datos de seguridad del betún asfáltico. (2011).
46. TABLA DE DENSIDAD DE LOS MATERIALES - Àrids Garcia. Available at: <http://www.aridsgarcia.com/es/la-oficina-virtual/tabla-de-densidad-de-los-materiales>. (Accessed: 8th July 2018)



Tabla 3: Materiales a emplear en los firmes de carretera en función de su categoría

Categoría de tráfico pesado	Comentarios
T00 y T0	Únicamente se podrá emplear explanadas de categoría E3 empleando en la capa de pavimento mezclas bituminosas u hormigón de firme. Los espesores de las diferentes capas vendrán determinados además por los materiales empleados en ellas.
T1	Se podrán realizar firmes en explanadas con categorías E2 y E3. De igual manera que en el caso anterior, además de por el tipo de vía, los espesores de las diferentes capas vendrán determinados además por los materiales empleados en ellas.
T2, T3 y T4	Para la construcción de los firmes se podrán emplear explanadas E1, E2 y E3. Las capas del firme vendrán determinadas por la categoría de tráfico empleado y el material empleado en cada capa.

Tabla 4: Espesores de las diferentes capas según la categoría de tráfico y explanada





Aprovechamiento de subproductos industriales en la fabricación de mezclas bituminosas

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO											
		T31			T32			T41			T42		
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	3111 MB 20 ZA 40	3112 MB 15 SC 30	3114 HF 21 ZA 30	3211 MB 18 ZA 40	3212 MB 12 SC 30	3214 HF 21 ZA 20	4111 MB 10 ⁽¹⁾ ZA 40	4112 MB 8 SC 30	4114 HF 20 ZA 20	4211 MB 5 ⁽¹⁾ ZA 35	4212 MB 5 SC 25	4214 HF 18 ZA 20
	E2	3121 MB 16 ZA 40	3122 MB 12 SC 30	3124 HF 21 ZA 25	3221 MB 15 ZA 35	3222 MB 10 SC 30	3224 HF 21 ZA 20	4121 MB 10 ⁽¹⁾ ZA 30	4122 MB 8 SC 25	4124 HF 20	4221 MB 5 ⁽¹⁾ ZA 25	4222 MB 5 SC 22	4224 HF 18
	E3	3131 MB 16 ZA 25	3132 MB 12 SC 22	3134 HF 21 ZA 20	3231 MB 15 ZA 20	3232 MB 10 SC 22	3234 HF 21	4131 MB 10 ⁽¹⁾ ZA 20	4132 MB 8 SC 20	4134 HF 20	4231 MB 5 ⁽¹⁾ ZA 20	4232 MB 5 SC 20	4234 HF 18

MB Mezclas bituminosas
 HF Hormigón de firme
 SC Suelocemento
 ZA Zahorra artificial

Espesores mínimos en cm

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Nota 1: Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

Nota 2: En la categoría de tráfico pesado T42 con tráfico de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/carril/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.