

# Valorización de la escoria como co-producto siderúrgico para un modelo de producción y consumo ambientalmente sustentable

Kiamaris Gorrín, Méndez María, Gisella Mujalli, Jesús López  
Anibal Rodríguez

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Metalúrgicas  
y de Materiales de SIDOR  
kgorrin@sidor.com

Fecha de recepción: 03 - 05 - 2016 Fecha de aceptación: 08- 06- 2016

## Resumen

La tendencia actual del sector siderúrgico es a la revalorización de los residuos, su principal subproducto, la escoria, tiene alto potencial de reutilización en los sectores de la construcción, infraestructura vial y agricultura. Este proyecto evaluó el comportamiento técnico ambiental de las escorias de horno eléctrico de SIDOR en función de sus potenciales aplicaciones. Se establecieron las variables que influyen en la calidad de la escoria considerando: (a) proceso de generación que determina el comportamiento ambiental

(lixiviación) y la estabilidad volumétrica; (b) tratamiento térmico que influye la composición mineralógica y físico-mecánica; y (c) procesamiento que determina la granulometría. Se determinó que las escorias de SIDOR son un material muy limpio con pocos finos, textura superficial rugosa, buena adherencia, altamente resistentes al desgaste, similar a los agregados convencionales. Los parámetros de lixiviación evaluados, se ajustaron a los límites permisibles para los usos ya normados. Las muestras estudiadas presentan distintos estados de expansión volumétrica, tienen alto contenido de MgO, y el CCE

muestra capacidades neutralizantes de suelos ácidos. Se identificaron ventajas significativas al ser utilizada en mezclas asfálticas y bases granulares, en distintas ramas de la construcción, así como fertilizante. El adecuado control de las variables de calidad maximiza su utilidad y redimiendo, su empleo evita la creación de zonas de préstamo de material y la consecuente afectación de espacios naturales.

**Palabras clave:** Escoria de Horno eléctrico; sub-productos; valorización; agregado siderúrgico; sustentabilidad ambiental

# Valorization of slag as a steel co-product for an environmentally sustainable production and consumption model

## Abstract

The current trend in the steel sector is to revalue waste, its main by-product, slag, has high potential for reuse in the construction, road infrastructure and agriculture sectors. This project evaluated the technical environmental performance of SIDOR's electric furnace slags according to their potential applications. The variables that influence the quality of the slag were established, taking into account (a) generation process that determines the environmental behavior (leaching) and

volumetric stability; (b) thermal treatment that influences the mineralogical and physical-mechanical composition; and (c) processing that determines the granulometry. It was determined that SIDOR slag is a very clean material with few fines, rough surface texture, good adherence, highly resistant to wear, similar to conventional aggregates. The evaluated leaching parameters were adjusted to the permissible limits for the already regulated uses. The samples studied present different states of volumetric expansion, have high MgO content, and the PCC shows neutralizing

capabilities of acid soils. Significant advantages were identified when used in asphalt mixtures and granular bases, in different branches of construction, as well as fertilizer. The adequate control of the quality variables maximizes its utility and redeeming, its use avoids the creation of material borrowing areas and the consequent affectation of natural spaces.

**Key words:** Electric furnace slag, by-products; valorization; steel aggregate; environmental sustainability

## Introducción

La industria siderúrgica, genera una cantidad importante de residuos que, pese a la adopción de medidas y procesos basados en los conceptos de producción más limpia, su generación permanece en cantidades significativas. La comunidad científica y la industria en su búsqueda constante de soluciones ante esta problemática ambiental, ha desarrollado técnicas de valorización de residuos industriales con medidas que no sólo consideran los aspectos técnicos y ecológicos, sino aspectos productivos y financieros, logrando un equilibrio entre lo industrial y lo ambiental. (Parra y Sánchez, (2010).

Uno de los principales subproductos generados en la industria del acero son las escorias. En este sentido, una variedad de usos se ha venido desarrollando a nivel mundial especialmente en el sector de la construcción e infraestructura vial con resultados viables y prometedores, al punto de ser considerados co-productos de la industria siderúrgica, debido a la importante valorización que han adquirido en los últimos años. Paralelamente, las tendencias crecientes del sector de la construcción civil y vial, demanda explotación de grandes cantidades de materiales para cubrir las necesidades del sector sin medir los impactos ambientales que causan dichas actividades. El aprovechamiento de las escorias negras, como agregado para concreto y asfalto, y el de las escorias

blancas para el mejoramiento de los suelos, representan algunas de las alternativas para frenar el deterioro provocado por la actividad minera e impulsar el mercado de residuos industriales.

En la Siderúrgica del Orinoco (SIDOR), existe actualmente un inventario aproximado de 10 millones de toneladas de escoria, ubicadas en un área denominada como Manejo y Procesamiento de Escoria (MAPE). El proceso de fabricación de acero tiene una capacidad de generación de escoria entre 225.000 y 340.000 ton/año, para cuyo tratamiento como subproducto se cuenta solamente con una planta de cribado (200 Ton/Hr ) para su deposición en el patio de almacenamiento (gran extensión de terreno); sin que se lleve un proceso de separación y molienda respectivas.

Desde el punto de vista técnico la valorización de las escorias en Sidor, daría respuesta a problemáticas tanto de la empresa como del país. En Sidor se solventarían los problemas relacionadas con el manejo de este subproducto de generación a gran escala y sus consiguientes complicaciones logísticas y ecológicas. A la vez que se generaría una potencial materia prima secundaria para el desarrollo de empresas aguas abajo, en áreas tan sensibles como la construcción (cemento y bloque), agricultura y la vialidad (balastros, asfalto), entre otros usos, que garantizaría el éxito de las misiones estratégicas del

gobierno, como los son la Gran Misión Vivienda Venezuela, el Plan Ferroviario Nacional, el desarrollo vial de la nación, entre otros.

Esta investigación busca darle respuesta a la debilidad de criterios técnicos medioambientales de calidad de las escorias, con el objetivo de garantizar su adecuado uso en las distintas aplicaciones. Haciendo énfasis en el estudio de las características, Desde el punto de vista técnico y de investigación en SIDOR es una prioridad buscar las mejores prácticas para los procesos de producción y fabricación, dando pie a la formulación del presente proyecto que busca evaluar estrategias de valorización de la escoria de horno eléctrico como agregado siderúrgico.

Este trabajo presenta un marco referencial que resalta la importancia del aprovechamiento y valorización de residuos industriales, las consideraciones esenciales de las características de las escorias de arco eléctrico y los criterios ambientales y técnicos a considerar.

## Materiales y Métodos

A continuación, se presentan en la tabla las actividades generales realizadas, con los respectivos métodos empleados para el análisis de los indicadores de interés para evaluar las estrategias de valorización de la escoria de horno eléctrico como agregado siderúrgico.

Tabla 1. Actividades metodológicas

Objetivos	Actividades generales	Indicadores
Análisis de la características de la escoria de SIDOR	Muestreo y reparación	Búsqueda y análisis de información. Reconocimiento, mapeo y ubicación de las escorias negras, blancas y mezclas. Gestión de recolección de. Preparación de las muestra para los distintos ensayos: Trituración, pulverización
Determinar el comportamiento ambiental y técnico de la escoria como agregado	Valoración del comportamiento ambiental como agregado	Ensayo de Lixiviación de la escoria, en contraste con las valora limites de las aplicaciones. Búsqueda selección y análisis de las normas de aplicaciones relacionadas a la utilización de la escoria como materia secundaria
	Valoración del comportamiento técnico como agregado	Búsqueda selección y análisis de las normas de aplicaciones relacionadas a la utilización de la escoria como materia secundaria Análisis Documental comportamiento técnico como agregado
Establecer las aplicaciones de las escorias de SIDOR, como agregado siderúrgico	Valorización de la escoria como agregado siderúrgico en aplicaciones de la construcción, vialidad y agrícola.	Análisis Documental, y comparativos con los resultados de los objetivos anteriores
	Identificación de las Especificaciones técnicas de cada aplicación	Análisis Documental, y comparativos con los resultados de los objetivos anteriores
	Aplicaciones actuales y potenciales, consideraciones para mejorar la viabilidad del agregado y diversificar las aplicaciones	

## Métodos aplicados para el análisis del comportamiento ambiental

El comportamiento ambiental de la escoria, se ve reflejado con la trazabilidad de elementos como MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Para su análisis se realiza un ensayo de lixiviación y se compara con los valores límites según el decreto 2635 “Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos”, y de acuerdo a los valores obtenidos se clasifica según tipo de riesgo (riesgo tipo 1, 2, 3,4). Para este estudio se realizó el mismo ensayo de lixiviación explicado, pero a fracciones granulométricas menores, debido a que a menor granulometría mayor es la potencialidad de lixiviación, los

resultados serán comparados con las normas de uso respectivos.

También se realizó el Cálculo de carbonato de calcio equivalente (CCE), que expresa la dureza, acidez o alcalinidad total del agua o la presencia en ella de dióxido de carbono, carbonato, bicarbonato; expresado en miligramos por litro (mg/l). Este se calcula multiplicando la cantidad de equivalentes químicos de cualquiera de estos componentes presentes en un litro por 50.

## Métodos aplicados para el análisis del comportamiento técnico

Análisis de pH: Se hizo reaccionar cada muestra de escoria pulverizada con el agua destilada a temperatura ambiente y someténdola a agitación. Luego con

el pH-metro se toma la lectura de pH en el momento en que se logra estabilidad del valor.

Según norma UNE83134 (1990), el pH (potencial de hidrógeno) es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas con pH menores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. Basicidad Cuaternaria: aplicado en la industria está dada por la relación:

$$B4 = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%H_2O}$$

## Ecuación 1

Densidad y porosidad: Los índices estructurales que dan idea de la agregación o estructura de las escorias son la

densidad aparente y la densidad real, y el espacio poroso total o porosidad.

Moliedabilidad: Se realizó un ensayo Bond y luego comparar los resultados con el índice de trabajo, según Wi Kodama y otros (2008).

## Resultados y Discusión

### Valoración del comportamiento ambiental como agregado

El comportamiento ambiental de este material se expresa en la trazabilidad de elementos como MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

En el análisis de lixiviación realizado por Sidor en el 2009, se concluyó que las escorias almacenadas en el patio de SIDOR, representan una clase de riesgo (1) que aplica para “compuesto en estado sólido, poco solubles, no inflamable, ni reactivos, no corrosivos, que, aunque contienen elementos que pueden ser perjudiciales al ambiente, los mismos no se liberan ni pasan a ambiente de forma inmediata; si se dispersan sobre el suelo pueden ser recolectados con utensilios manuales o mecánicos sin exigir equipo de protección completa al trabajador” Decreto 2635.

Basado en estos resultados la escoria de aceria de arco eléctrico producida en SIDOR, se puede considerar un sub-producto no peligroso.

Considerando la escoria un agregado siderúrgico, se realizó un análisis de lixiviación a las muestras, pero a granulometrías menores a 1” esto debido a que

es la de mayor demanda y bajo la premisa de que a menor tamaño mayor potencial de lixiviación, tanto con el decreto como con los valores límites establecido en normas de bases, sub bases y capas de rodaduras. Para las aplicaciones de construcción aun no establecen formalmente límites. Los resultados son presentados en la tabla 2 junto con los límites establecido para su utilización.

Tal y como queda reflejado en la tabla 2, los parámetros evaluados en el extracto lixiviado de las muestras (1, 3 y 4), se ajustan a los límites permisibles establecidos tanto por el decreto 2635, como por los límites establecido en normas de bases, sub-bases y capas de rodaduras. Siendo este un punto crítico para dar el siguiente paso a la valorización de este agregado, los análisis señalan que estas muestras no representan una amenaza.

Es importante no dejar a un lado que estos resultados solo corresponden a las escorias muestreadas y no son extrapolables a la totalidad de las escorias

generadas. De igual forma es necesario establecer consideraciones de uso de la mano de expertos para aquellas aplicaciones (construcción y agricultura) donde los límites no han sido normados para este tipo de agregado.

Para el uso de este agregado en agricultura, la aplicación del criterio de afectación en la composición del suelo, implica el cálculo de valores denominados de inmisión (a porte al suelo de los contaminantes en la escoria), la interoperación de los valores claves de emisión (cantidad de contaminantes que se liberan de las escorias en el plazo de tiempo dado) con los valores máximos permitidos define el comportamiento de las escorias.

Este tipo de análisis requiere la aplicación de una metodología especializada, que no forma parte del alcance este proyecto, pero que debe tomarse en cuenta para el desarrollo en detalle de algunas de las aplicaciones.

**Tabla 2. Comparación de los resultados del análisis de lixiviación a granulometría menos a \*\* con el decreto 2635 y valores límites para sus aplicaciones en vialidad**

Parámetro (mg/L)	Concentración			Decreto 2635	Bases y sub-bases	Capa de Rodadura
	Muestra 1	Muestra 3	Muestra 4			
Bario	0.47	6.8	0.28	100	17	**
Cadmio	< 0.007	< 0.007	< 0.007	1.0	0.009	0.6
Cromo Hexavalente	< 0.02	< 0.02	< 0.02	5.0	2.6	**
Níquel	< 0.03	< 0.03	< 0.03	5.0	0.8	**
Plomo	< 0.1	< 0.1	< 0.1	5.0	0.8	**
Selenio	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1.0	0.007	0.02
Fluoruros	0.31	< 0.017	< 0.017	**	18	**
Zinc	0.18	0.17	0.17	**	1.2	**
Molibdeno	< 0.1	< 0.1	< 0.1	**	1.3	**
Vanadio	< 0.5	< 0.5	< 0.5	**	1.3	**
Sulfatos	14	14	27	**	377	**

\*\*No se han establecido límites para este parámetro.

Sin embargo, se realizó el cálculo del parámetro CCE, índice cáustico, que se utiliza para definir la cantidad que debe agregarse al terreno para su neutralización en función de su grado de acidez determinado, tal como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Cálculos del carbonato de calcio equivalente CCE**

Muestras	CCE
Muestra 1:	71,27
Muestra 2	52,21
Muestra 4:	58,61

Las muestras de escorias SIDOR cumplen con el porcentaje de carbonato de calcio equivalente e Índice Cáustico lo que constituyen materiales alcalinos con capacidades neutralizantes de suelos ácidos para aplicaciones agrícolas.

La escoria también contiene Si, que se ha demostrado que aumenta los rendimientos de los cultivos herbáceos, tales como el arroz y la caña de azúcar, y el Si también ayuda a defender a los cultivos contra enfermedades de los cultivos.

El principal resultado revela que las escorias destacadas por contener una gran cantidad de compuestos ácidos contribuyen en la disminución de la lixiviación de especies peligrosas, aunque esta condición no es suficientemente confiable para garantizar la producción de producto inocuo e inerte. Específicamente, microestructura eutéctica ó de bajo punto de fusión promueven configuraciones vítreas de la escoria. El punto de fusión alto puede cristalizar durante la solidificación evitando la formación de

estructuras amorfas. Por esta razón, el correcto equilibrio de ácidos y especies básicas en las escorias (MgO, CaO, FeO y SiO<sub>2</sub>) es fundamental para obtener la favorable microestructura y evitar la lixiviación química.

Valoración del comportamiento técnico de las escorias como agregado siderúrgico Una vez verificado el cumplimiento de los criterios medioambientales, se deben confirmar que desde el punto de vista técnico cumplen con los criterios establecido para la aplicación en estudio. De acuerdo a las propiedades generales de las escorias de acería, se han detectado y comprobado aplicaciones satisfactorias en vialidad, construcción y agricultura, por las propiedades resumidas en el en la tabla 4.

**Tabla 4. Principales aplicaciones de la escoria de acería de acuerdo a sus características**

Propiedades	Aplicación
Duro, resistente al desgaste	Agregado para concreto asfáltico
Propiedad hidráulica	Base como material granular
Gran ángulo de fricción interna	Material para obras de ingeniería civil
Componentes :FeO, CaO, SiO <sub>2</sub>	La materia prima para el clínker de cemento
Componentes: CaO, SiO <sub>2</sub> , MgO, FeO	Los fertilizantes y el mejoramiento del suelo

A continuación, se describe de forma resumida la validez ambiental y técnica reseñada por distintos autores en las aplicaciones estudiadas en esta investigación.

Tabla 5. Validez técnica y medio ambiental de las Escorias Negras

Aplicaciones	Validez Ambiental	Validez Técnica
Bases y sub-bases de carretera (negra)	El contacto con el suelo debe suponer un cambio en la composición del suelo inferior al 1% Test de lixiviación. Cumplir con los límites establecidos de Cd, Se	Elevada capacidad portante, elevada resistencia mecánica Dureza elevada, coeficiente de Los Ángeles menor de 35 Test de hinchamiento no superior al 0,5%. Áridos limpios (equivalente arena superior a 30)
Capa de rodadura Mezclas asfálticas (negra)	Según el test lixiviación, cumplir con los límites establecidos de Ba, Cd, Cr, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn, S04-2, F. Espesor máximo 0,7 m	Test de hinchamiento no superior al 0,5%, aunque este riesgo se ve disminuido ya que la escoria estaría rodeada de betún, impermeabilizándola. Granulometría fija entre Grava13-17mm ; Gravilla6-13 mm ; Arena0-6 mm Buena adherencia Buen coeficiente de los Ángeles Excelente coeficiente de pulido
Balasto de vías férreas (negra)	Test de lixiviación	Granulometría: Grava 12,5 mm a 20 mm, Gravilla 5mm a < 12,5 mm, Arena < 5 mm
En mezclas de concreto para la construcción (negra)	Test de lixiviación Presencia de CaO, sulfatos y sulfuros. Control de emisión por chimeneas de plomo, zinc, cadmio y níquel	Granulometría: 0-11,3 ; 11,3 - 32; 32 - 45; 45 - 64 en mm Controlar dosificación en función a la cantidad MgO
Fabricación del Clinker (negra)	Revisión del % cromo y el manganeso, que aumentas en la fabricación Control de emisiones por chimenea	Control de dosificación (sin especificación) Granulometría: 100% entre 37,5 mm (1 ½ pulg.) y 9,5 mm (3/8 pulg.)
Sustituto de la marga(Blanca)	Determinación de metales presentes en las partículas en suspensión emitidas por chimenea y en clinker. Control de calidad medio ambiental por potenciales problemas con fluoruros en cantidades elevadas.	Fluoruro menor a 1.4 El magnesio no debe ser superior al 2% según norma, por lo que su dosificación máxima es 5%. Granulometría uniforme y menor a 50mm y que no incluya materiales extraños
Remineralización del suelo, Fertilizante (Blanca)	La aplicación del criterio de afectación en la composición del suelo	Tamaño: < 1/8 pulgada, 2 a 5 mm, 100% <14mm, 95% <12mm, Agua:>1% (CaO), CCE: 25-85%, Índice Caústico (Ca+Mg)/(Na+K) > 2.5

Fuente: IBOHE, 1997; Sierra, 2008; Zaragoza, 2001; Parra, 2012

Se puede concluir que los parámetros evaluados en el extracto lixiviado de las muestras (1, 3 y 4), se ajustan a los límites permisibles establecidos tanto por el decreto 2635, como por los límites establecidos en normas de bases, sub-bases y capas de rodaduras. Siendo este un punto crítico para dar el siguiente paso a la valorización de este agregado, los análisis señalan que estas muestras no representan una amenaza.

Es importante no dejar a un lado que estos resultados solo corresponden a las escorias muestreadas y no son

extrapolables a la totalidad de las escorias generadas.

### **Establecer las aplicaciones de las escorias producidas en SIDOR, como agregado siderúrgico**

#### **Valorización de la escoria como agregado siderúrgico**

En un análisis de valorización de las escorias se deben considerar criterios técnicos, ambientales y económicos. La diversidad de las alternativas de

reciclaje, están en dependencia a las estrategias empleadas para garantizar la calidad del sub-producto generado, de forma tal que cumpla las propiedades apropiadas como materia prima secundaria. Las empresas que activamente utilizan este sub-producto aseguran que los costos de valorización, son por lo menos similares o menores que los de no valorización de la escoria y que las distintas vías potenciales de reciclaje podrían ser capaces de absorber la totalidad de las escorias generadas. Otra ventaja significativa, es la consecuente reducción del consumo de recursos

naturales en las explotaciones de las canteras de las calizas naturales, así como el desalojo de grandes patios de almacenamiento (vertederos inertes), a lo que se le suma la dinamización que propicia el comportamiento sustentable de la industria, con actuaciones ambientales más responsables.

Aun existiendo un elemento negativo en materia de transporte (material denso y pesado), estos son superado por las variantes positivas, ya la escoria proporciona beneficios como mayor durabilidad, mejor estabilidad, carpetas antideslizantes además de las ventajas en el costo de producción (ya que no

amerita ni perforar ni dinamitar). Esto acompañado de políticas de Estado que estimulen la valorización del subproducto como estrategias sustentables, no solo validarían la factibilidad de valorización si no potencializarían los beneficios ambientales, estratégicos y técnico-económicos de su utilización.

Figura 1. Ficha técnica del uso del agregado siderúrgico en la aplicación Vitalidad

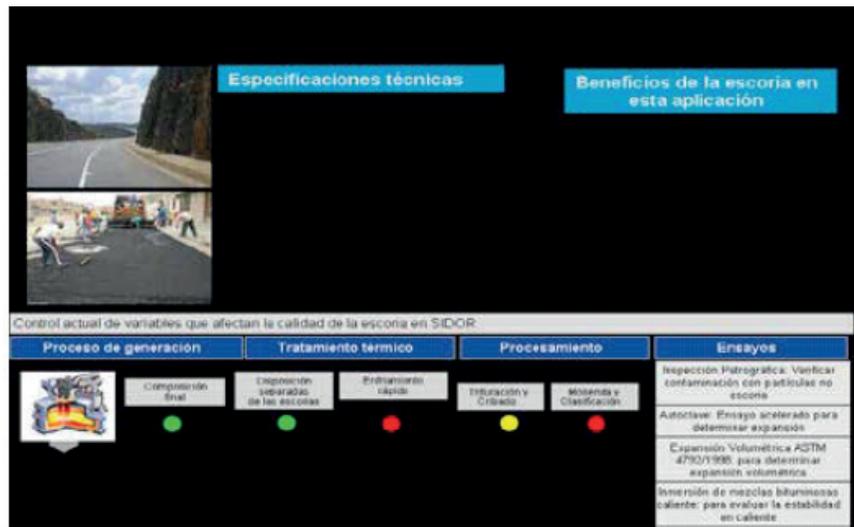


Figura 2. Ficha técnica del uso del agregado siderúrgico en la aplicación Construcción

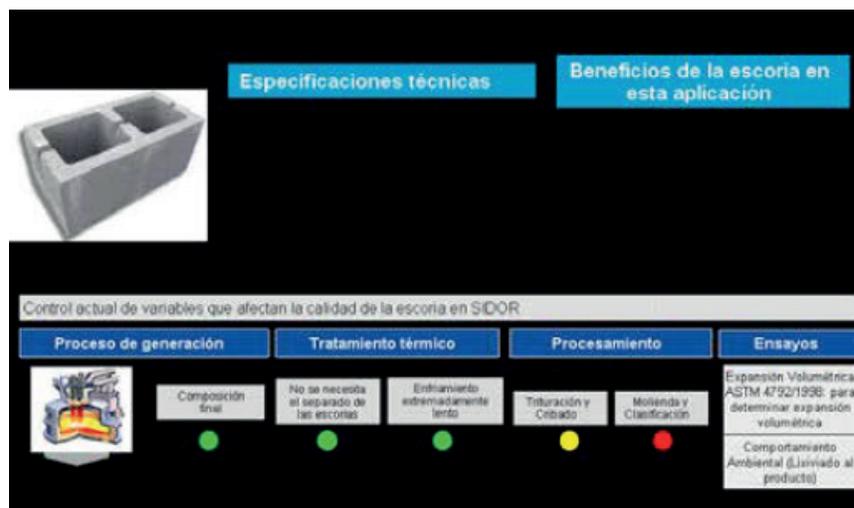
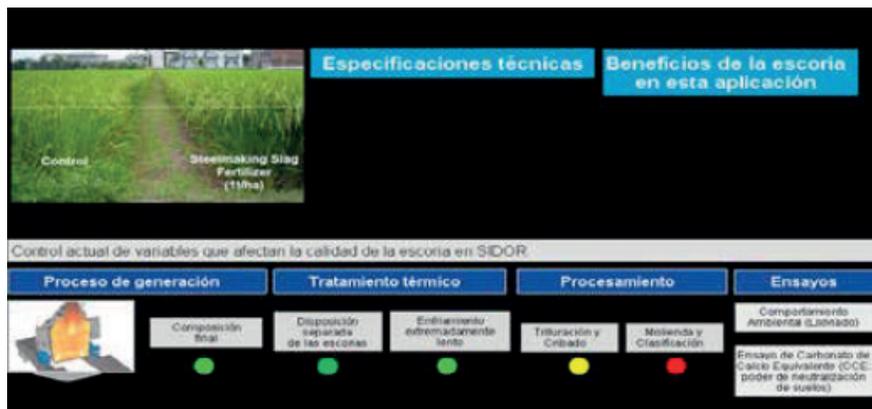


Figura 3. Ficha técnica del uso del agregado siderúrgico en la aplicación Agricultura



## Conclusiones

Las características encontradas, nos confieren criterios técnicos y ambientales más sólidos, permiten dar pasos seguros en estudios detallados para las diferentes aplicaciones de interés, conociendo las fortalezas y debilidades de la escoria almacenada en patio y considerando realizar estudios en pro de las mejores prácticas de manejo de escoria para maximizar su uso y rendimiento, así como diversificar la aplicaciones, establecimiento de recomendaciones y propuestas de manejo y procesamiento de escoria a corto, media y largo plazo.

De igual forma es necesario establecer consideraciones de uso de la mano de expertos para aquellas aplicaciones (construcción y agricultura) donde los límites no han sido normados para este tipo de agregado.

En cuanto a las escorias negras existente, los elementos claves para la validez técnica de este agregado, que debe ser considerados, como lo es el ensayo de hinchamiento de expansión volumétrica, que se presenta como especificación técnica determinante y que nos

permitiría clasificar las escorias del patio de acuerdo a su potencial aplicación. El alto contenido de MgO en las escorias estudiadas implica también el estudio detallado de dosificaciones para las aplicaciones que así lo ameriten. Las escorias blanca amerita estudios más minuciosos, no solo que consideren la variabilidad del la composición química de las mismas, si no los ensayos de afectación al suelo no contemplado en este proyecto.

Se requiere entonces emprender una nuevas investigaciones que permita ajustar todos los aspecto técnico y logístico que viabilicen la sustentabilidad de las aplicaciones de este agregado siderúrgico, en este sentido se vine avanzando en la conformación de un red de investigación e innovación que derive en distintas líneas investigativas para potenciar la valoración del agregado siderúrgico.

## Agradecimientos

Queremos agradecer a Siderúrgica del Orinoco “Alfredo Maneiro”, por haber permitido la publicación de este trabajo y a las instituciones: PDVSA-INTEVEP,

INTERLAB y UNEXPO, por el apoyo recibido.

## Referencias Bibliográficas

- IHOBE. (1997). Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escoria de acerías. *Sociedad pública de gestión ambiental. Gobierno Vasco*.
- Parra, Lina y Sánchez, Diana, (2010). Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Dia-co. *Facultad de ingeniería, Bogotá. Colombia*.
- Sierra, E. G. (2008). Evaluación de la Escoria de Horno como Agregado en Mezclas Asfálticas.
- Zaragoza, R. Valdés, A. Nassur Bogachkov, A. A. Gómez, C D Tápanes Robau. (2001). Utilización de las escorias de los hornos de arco eléctrico y de cuchara como materiales de construcción. *Revista Ingeniería Mecánica*.