



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia- Química

# **Evaluación de escorias blancas de acería como sustituto parcial de cemento Portland**

---

**Tesis en Opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

**Autor: Isierys León Aguilar**

**Firma: \_\_\_\_\_**

**Tutor: Prof. Asist. Roger Samuel Almenares Reyes, MSc.**

**Firma: \_\_\_\_\_**

**Moa  
2017**

## DEDICATORIA

- *A mi madre Ireisys Aguilar Ramo y a mi padre Eriseidy León Rodríguez por su amor, educación a lo largo de mi vida y por siempre creer en mí.*
- *A mi hermano Dylan León Aguilar que es lo más importante en mi vida.*
- *A mis abuelos y familia en general.*
- *A todos los que creyeron y confiaron en mí.*

## AGRADECIMIENTOS

- *Muy especial al tutor MSc. Roger Samuel Almenares Reyes por todo su apoyo sincero e incondicional en la realización de esta tesis.*
- *A mi madre Ireisys Aguilar Ramo y a mi padre Eriseidy León Rodríguez que siempre confiaron en mí y toda la educación que me transmitieron, no hay palabras para agradecerle.*
- *A mi hermano Dylan León Aguilar.*
- *A mis abuelitos en especial a mis abuelas Julia Rosa y Maricela por su amor y cariño; a mi familia en general.*
- *A mi novio Helder Vemba Mocuta Lito que siempre estuvo a mi lado y supo comprenderme.*
- *A mi tía Raquel por sus consejos a lo largo de estos años.*
- *A mi amiga Yudenia Montes Borrote por estar junto a mí en los buenos y malos momentos, por sus consejos y siempre entenderme.*
- *A mis amigas Leryanis, Eni y Leidy Laura.*
- *A mis compañeros de aula en especial Rosalía, Ernesto y Jorge por su compañía en los buenos y malos momentos.*
- *A los profes que me dieron clase y a los que consejos sanos supieron darme; a todos los que de una y otra forma hicieron realidad este sueño y que no los menciono aquí GRACIAS de corazón.*

## **PENSAMIENTO**

“El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamiento porque precisamente eso es lo que estamos sembrando, lo que estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia”

Comandante en Jefe **Fidel Castro Ruz**



## **RESUMEN**

En el presente trabajo se evaluaron las escorias blancas de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas como sustituto parcial de cemento Portland, para su utilización como materiales cementicios suplementarios. Se realizó una caracterización química y mineralógica de la muestra de escoria blanca mediante fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X, respectivamente. La caracterización granulométrica fue analizada mediante granulometría láser en un analizador de tamaño de partículas y el análisis de tamices para las muestras sin moler. El índice de actividad de resistencia fue determinado mediante ensayos de resistencia a la compresión a partir del método indicado en la norma NC TS 528:2013. La composición química de la muestra de escoria blanca muestra que es un material que se encuentra en el intervalo de la composición química de materiales de este tipo, trabajados y reconocidos como material cementicio suplementario. Las principales fases minerales identificadas por DRX en la escoria son silicato de calcio, hidrosilicato de calcio y aluminato, compuestos de elevadas propiedades aglomerantes. El índice de actividad de resistencia, a los 7 y 28 días, es de 81 y 85 %, respectivamente. Las escorias blancas de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas pueden considerarse como un material cementicio suplementario capaz de sustituir 30 % de cemento P-35, para proporcionar un aglomerante con resistencia similar a un cemento PP-25.

## **ABSTRACT**

In the present work the white slag from the Steel Company of Las Tunas was evaluated as a partial substitute of Portland cement for its use as supplementary cementitious materials. A chemical and mineralogical characterization of the white slag sample was performed by X-ray fluorescence and X-ray diffraction, respectively. The granulometric characterization was analyzed by laser granulometry in a particle size analyzer and the sieve analysis for the samples without grinding. The strength activity index was determined by tests of compressive strength from the method indicated in the standard NC TS 528:2013. The chemical composition of the white slag sample shows that it is a material with chemical composition in the range for these materials, worked and recognized as supplementary cementitious materials. The main mineral phases identified by XRD in the slag are calcium silicate, calcium hydrosilicate and aluminate, compounds with high binder properties. The strength activity index, at 7 and 28 days, is 81 and 85 %, respectively. White steel slag from the Stainless Steel Company of Las Tunas can be considered as a supplementary cementitious material able replacing 30 % of P-35 cement to provide a cementitious system with similar strength at PP-25 blend.

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEORICO CONCEPTUAL.....</b>	<b>5</b>
1.1. Producción del cemento Pórtland. Generalidades .....	5
1.2. Materiales cementicios suplementarios. Contexto actual .....	6
1.3. Escorias de acerías. Origen y clasificación .....	8
1.4. Empleo de escorias blancas.....	10
1.5. Estado actual del uso de las escorias en el mundo.....	14
Conclusiones parciales .....	15
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
2.1. Diseño de la experimentación .....	18
2.2. Selección y toma de la muestra .....	19
2.3. Técnicas empleadas en la caracterización de la escoria blanca .....	20
2.4. Determinación de la composición granulométrica .....	20
2.5. Metodología para la elaboración de los morteros.....	21
2.6. Procedimientos para los ensayos de resistencia mecánica .....	25
2.7. Determinación del índice de actividad de resistencia.....	26
Conclusiones parciales .....	27
<b>3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. Resultados de la caracterización química .....	29
3.2. Composición mineralógica de la muestra natural .....	31
3.3. Composición granulométrica .....	32
3.4. Resultados de la caracterización físico-mecánica en morteros.....	34
3.5. Valoración socioeconómica y ambiental.....	35
Conclusiones parciales .....	37
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>38</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>39</b>

**BIBLIOGRAFÍA.....40**

# INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

La generación de residuos se ha convertido en un importante problema de contaminación ambiental. Como consecuencia, las industrias deben encargarse del correcto manejo de los residuos generados durante todo el proceso de fabricación y al final, de su correcta disposición y/o reutilización (Serrato, 2014).

El reciclaje es un proceso que tiene como propósito convertir los desechos en nuevos productos para prevenir el desuso de probables materiales potencialmente útiles, reduciendo el consumo de nueva materia prima y así favorecer a la preservación del medio ambiente. Hoy en día en las industrias siderúrgicas, se produce 30 000 toneladas de acero mensuales y aproximadamente el 8 % de esta producción es escoria, es decir, se emite 2 400 toneladas de escoria y residuos ferrosos mensuales (Cuásquer, Altamirano, 2015). Esta escoria es tamizada y triturada, gran parte de la escoria fina es vendida a las compañías cementeras, y las usan como puzolanas. Sin embargo las escorias de acero, en su mayoría, se depositan y su acumulación provoca negativos impactos al medio ambiente, por lo que se requiere de estudios de la escoria como un material reciclado, para usarse como material de construcción (Losáñez, 2005 ; Rodríguez, 2008). Por ello y dentro de las medidas de protección ambiental se busca incluir la escoria de acero a manera de constituyente en la producción de hormigón amigable con el medio ambiente.

A pesar de ser la escoria un residuo de la producción de acero esta puede ser utilizada en la agricultura para tratamiento de suelos sulfato-ácidos. En la construcción tiene disímiles usos en explanadas, bases y sub-bases de carreteras, en capa de rodadura de pavimentos y como aditivo al clínquer en las plantas productoras de cemento, entre otras (Boza-Regueira, 2011). Por esta razón existen varios trabajos a nivel internacional que tratan el tema del uso de las escorias de acería en la construcción (Luxán, 1995)

La necesidad de mitigar el impacto ambiental que provoca la deposición de escorias ha estimulado el incremento de su utilización como Materiales Cementicios

Suplementarios (MCS), premezclados con clínquer o añadido durante la fabricación de hormigones (Kocaba et al., 2012). Es por ello que dentro de las medidas de protección ambiental se busca incluir las escorias como constituyentes en la producción de cemento amigable con el medio ambiente (Cuásquer, Altamirano, 2015).

En la planta de aceros inoxidables de Las Tunas (ACINOX - Las Tunas), se vierten como promedio en un año aproximadamente 12 900 toneladas de escoria y de ellas el 16 % es de escoria blanca (Boza-Regueira, 2011). Estas escorias del proceso de producción de acero, en la actualidad es un factor contaminante del medio ambiente y que no es aprovechado para su empleo como MCS.

Por lo anterior, en el presente trabajo de diploma se identifica como necesidad la evaluación de la incorporación de escorias blancas en morteros de cemento Portland, constituyendo esto la **situación problémica** de la investigación.

Como **problema de la investigación** se plantea: El insuficiente conocimiento del comportamiento físico – mecánico de cementos adicionados con 30 % de escoria blanca de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas limita su utilización como materiales cementicios suplementarios.

El **objeto de estudio** lo constituyen las escorias blancas de acerías de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas y como **objetivo general se plantea**:

Evaluar las escorias blancas de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas como sustituto parcial de cemento Portland para su utilización como materiales cementicios suplementarios.

Por lo cual, se parte de la siguiente **hipótesis**: Si se evalúa el comportamiento físico – mecánico de cementos adicionados con 30 % de escoria blanca de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas es posible valorar su utilización como materiales cementicios suplementarios.

Para lo cual se establecen como **objetivos específicos**:

- Caracterizar desde el punto de vista químico y mineralógico las escorias blancas de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas.

- Determinar el índice de actividad de resistencia en sistemas cemento Portland – escorias blancas.

**Y su campo de acción:** Comportamiento físico-mecánico de cementos adicionados con 30% de escoria blanca.

Las **tareas de la investigación** que ayudan a cumplir con los objetivos planteados son las siguientes:

- Búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con los materiales puzolánicos y las escorias blancas para su empleo como material cementicio suplementario.
- Selección y preparación de la muestra.
- Caracterización química y mineralógica de la materia prima.
- Molienda de la escoria blanca hasta alcanzar un 90 % pasado por el tamiz 0,09 mm.
- Fabricación de los morteros con 30 % de sustitución de cemento por escoria blanca.
- Determinación del índice de actividad de resistencia de los morteros obtenidos.
- Análisis de las perspectivas de utilización de las escorias blancas como fuente de materiales cementicios suplementarios.

**1.**

## **1. MARCO TEORICO CONCEPTUAL**

El presente capítulo se realiza un análisis sobre los elementos principales relacionados el empleo de escorias blancas como material cementicio suplementario que contribuyan a la fundamentación de.

### **1.1. Producción del cemento Pórtland. Generalidades**

El hormigón es uno de los materiales más empleados por el hombre debido a su relativo bajo costo de producción y versatilidad, y gran disponibilidad de materias (Scrivener, 2014). La fabricación de hormigón deja una huella ecológica que si se compara con otros materiales de construcción como el acero y la madera, el impacto ambiental que genera es menor en términos de unidad de producción, pero los volúmenes masivos en que es fabricado, lo hacen responsable de cerca del 9 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Purnell, 2013).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> relativas al hormigón, corresponden fundamentalmente a las emisiones asociadas al cemento, su principal constituyente. La emisión de CO<sub>2</sub> ocurre a través de la descarbonatación de las materias primas utilizadas en el proceso de producción del cemento y el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía directa e indirecta. Aproximadamente el 60 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de producción del cemento Portland ordinario están asociadas a la descomposición de la caliza durante la obtención del clínquer (WBCSD/IEA, 2009 ; Lothenbach et al., 2011 ; Juenger et al., 2012 ; Teklay et al., 2014). Sobre la base del modelo estándar de producción de cemento usado actualmente y las tecnologías disponibles, se estima que por cada tonelada de cemento producida se emiten entre 0,65 – 0,90 toneladas de CO<sub>2</sub> (Gartner, Hirao, 2015 ; Gartner, 2004), lo cual

representa entre 5 – 8 % del CO<sub>2</sub> a escala global (Scrivener, 2014 ; Damineli et al., 2011).

Ante las preocupaciones existentes con respecto al cambio climático, diversos países y corporaciones reconocen la necesidad de implementar políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental. Existe una estrategia común, sustentada en cuatro líneas de trabajo fundamentales (WBCSD/IEA, 2009 ; Taylor et al., 2006 ; WBCSD, 2015 ; WBCD - CSI, 2012): (1) la mejora en la eficiencia de los procesos, (2) el uso de fuentes alternativas de combustibles, (3) la captura y almacenaje de CO<sub>2</sub> y (4) la reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios. La línea de trabajo (4) es la alternativa más promisoría a mediano y a corto plazo (WBCSD/IEA, 2009 ; WBCSD, 2015).

Dentro de las limitaciones de los MCS se encuentra en su disponibilidad, debido a que muchos de estos materiales no se encuentran distribuidos de manera uniforme en el mundo. Y en otros casos no se aprovechan las potencialidades regionales. Por tanto, el mayor reto para el aumento de los niveles de sustitución de clínquer a partir del uso de MCS radica en la identificación y evaluación de nuevas fuentes de este tipo de materiales en base a su disponibilidad regional.

## **1.2. Materiales cementicios suplementarios. Contexto actual**

La definición general de MCS abarca un gran número de materiales, que varían ampliamente en término de origen, composición química y mineralógica y características morfológicas. Los MCS comprenden aquellos materiales que muestran comportamiento hidráulico, que se endurecen en presencia de agua para formar productos cementicios en una reacción de hidratación (Snellings, 2011), y aquellos que muestran comportamiento puzolánico, y que se definen como materiales silíceos o aluminio-silíceos, los cuales por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementicias (ACI, 2000).

Las cenizas y tobas volcánicas, pumitas o piedra pómez y tierras diatomeas, son los ejemplos más comunes de puzolanas naturales (ACI, 2000 ; Snellings, 2011 ; Ramezaniapour, 2014). Otro de los materiales naturales que ha sido introducido como material cementicio suplementario en pequeñas cantidades es la caliza pulverizada sin calcinar (Damtoft et al., 2008 ; Ramezaniapour, 2014). Entre las puzolanas artificiales más comunes se incluyen los subproductos o desechos de procesos industriales como son las cenizas volantes, las escorias granuladas de alto horno, y el humo de sílice; a este grupo se les suman las pizarras y arcillas calcinadas, los residuos de productos cerámicos, así como las cenizas provenientes de procesos agrícolas como las de cáscara de arroz y las de bagazo de caña (Martirena et al., 1998 ; ACI, 2001 ; Toledo Filho et al., 2007 ; Papadakis, Tsimas, 2002).

Actualmente en la sustitución del clínquer, la mayor parte de los materiales cementicios suplementarios empleados lo constituyen: subproductos del sector industrial como las cenizas volantes (subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica), las escorias de altos hornos (subproducto de la industria siderúrgica), y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio). Mientras tanto, otras abundantes reservas de materiales puzolánicos permanecen sin explotación, como las puzolanas naturales, la ceniza de la cáscara de arroz y las arcillas activadas térmicamente (Martirena, 2004).

Las escorias de alto horno (GBFS) constituyen, después de las cenizas volantes, el MCS más empleado en la producción de cemento (Humphreys, Mahasen, 2002). Las escorias de alto horno pueden sustituir hasta un 70 % de clínquer en el aglomerante, pero la cantidad de escorias disponibles en todo el mundo actualmente representa solo el 5 % de la cantidad de clínquer producido (Scrivener, 2014) y su disponibilidad y localización dependen de los volúmenes de producción de hierro y de la existencia de industrias metalúrgicas generadoras a nivel local o regional.

En Cuba, particularmente, no existen tecnologías metalúrgicas de las cuales se obtengan subproductos como las GBFS. Sin embargo, existen dos grandes

industrias de acero, las cuales generan gran cantidad de escorias que no son considerados como una fuente alternativa de MCS.

### 1.3. Escorias de acerías. Origen y clasificación

La escoria es un subproducto de la industria de acero formado fundamentalmente por calcio, hierro y silicato de magnesio, que se obtiene por las reacciones químicas que tienen lugar en los procesos de formación de los metales (Fernández-Ruiz, 2015).

Las escorias generadas en la producción de acero por el proceso de horno de arco eléctrico son, en su mayoría, de dos tipos: oxidantes y reductoras o negras y blancas, respectivamente (Figura 1.1). Esta nomenclatura se debe a las dos etapas de las que consta dicho procedimiento que son: fusión (marcha oxidante) y afino (marcha reductora) (Amaral De Lima, 1999).

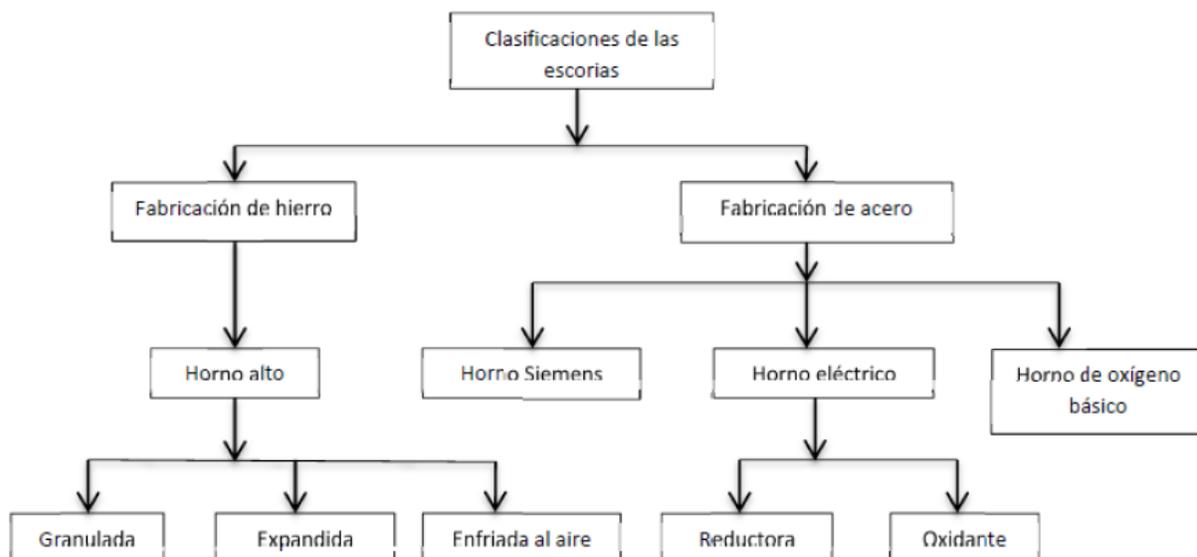


Figura 1.1. Clasificación de la escorias según su procedencia (Amaral De Lima, 1999)

La escoria negra se obtiene en la primera etapa del proceso y está compuesta principalmente por óxido de hierro, calcio, silicio y aluminio. De esta se genera un volumen mucho mayor que de la escoria blanca, la cual posee una cantidad alta de finos provenientes del fenómeno de pulverización del silicato bicálcico durante el enfriamiento de la escoria (Fernández-Ruiz, 2015).

La formación de escorias en los hornos de arco eléctrico (HAE) se realiza entre otros motivos para favorecer las reacciones químicas de los procesos de fusión y afino. El mayor volumen de escoria se origina durante el proceso de fusión donde se produce la fase oxidante del líquido fundido. La oxidación del hierro y otros metales presentes en la chatarra, utilizada como materia prima, produce óxidos que pasan a la escoria.

Las escorias de acero son el conjunto de escorias generadas en la producción de este material, se clasifican de maneras diversas de acuerdo al tipo de acero, al proceso de producción, al pretratamiento (en caso de haberlo), al pH, al color y al enfriamiento, entre otros. El proceso de fabricación del acero, tanto común como especial, en las acerías de horno de arco eléctrico se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o fusión, donde se produce la fusión de las materias primas que se realiza en hornos de arco eléctrico, y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del baño fundido, que se inicia en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara.

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

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

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

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

Los principales factores que influyen en la cantidad de escoria HAE producida son el contenido de óxido de hierro, la basicidad de la escoria, el volumen de alimentación de oxígeno, el tipo de carbón utilizado y la eficiencia del arco eléctrico. La procedencia de cada tipo de escoria es de procesos completamente distintos con lo que las propiedades y composición química de cada una difieren radicalmente. Mientras que la escoria negra está formada principalmente por óxidos de calcio, silicio y hierro la escoria blanca está formada principalmente por óxidos de calcio y magnesio siendo esta última más sensible a los parámetros que han influido en los procesos que la han formado. Debido a que tanto sus propiedades como sus posibilidades de valorización son claramente diferentes, es fundamental la separación entre escorias negras y blancas (Fernández-Ruiz, 2015).

Debido a la presencia más numerosa de óxidos básicos o metálicos en la escoria negra, esta tiene un carácter oxidante, mientras que la presencia de óxidos ácidos en la escoria blanca le proporciona un comportamiento reductor. La escoria negra tiene propiedades mucho más resistentes que a la blanca y un color generalmente gris muy oscuro, casi negro. En cambio, la escoria blanca es de color blanquecino, pulverulenta y se disgrega al tocarla.

#### **1.4. Empleo de escorias blancas**

La valorización de las escorias es corriente en los tiempos actuales. Las escorias negras debido a sus propiedades, y puede decirse también a la mejor calidad en general como material para la construcción respecto a la escoria blanca, proporcionan un abanico más amplio de posibles usos. Sin embargo, las escorias blancas son usadas, además de reintroducirlas en los hornos de arco eléctrico para mejorar el proceso de fusión, como materia prima para los hornos rotativos de las cementeras y mezcladas con las escorias negras como áridos en morteros y hormigones. A su vez, existen varios estudios que tratan de implementar la escoria blanca como fino en mezclas bituminosas o hidráulicas, como mezcla en terreno

natural o artificial para la estabilización de suelos y firmes o como agente físico-químico en el filtrado de aguas (Losáñez, 2005).

La cantidad de escorias generada es un problema ambiental importante por su generación continua, su creciente almacenamiento y por sus pobres características para ser reutilizada, optándose en la mayoría de los casos por la disposición final (Ren, Wang, 2012), razón por la cual se han realizado numerosas investigaciones sobre sus usos y aplicaciones, con la intención de reincorporarlas en un proceso productivo.

A pesar de ser la escoria un residuo de la producción de acero esta puede ser utilizada en la agricultura para tratamiento de suelos sulfato-ácidos. En la construcción tiene disímiles usos en explanadas, bases y sub-bases de carreteras, en capa de rodadura de pavimentos y como aditivo al clínquer en las plantas productoras de cemento, entre otras (Yi et al., 2012).

Por lo regular, las escorias a excepción de las de alto horno, contienen un buen porcentaje en masa de metales que pueden recuperarse siendo una fuente secundaria para la extracción o recuperación de metales, más que un residuo final. Además, algunas escorias contienen una importante cantidad de metales pesados dañinos para la salud humana y la liberación de éstos podría generar problemas a los ecosistemas (Shen, Forssberg, 2013).

De manera específica, se ha estudiado los progresos y tendencias actuales en la activación de propiedades cementantes de diferentes escorias, de acuerdo con sus investigaciones realizadas concluyen que las escorias activadas con álcali como las de alto horno, las de acero en general, las de cobre y las de fósforo presentan mayores resistencias mecánicas a edades tempranas y tardías al ser comparadas con el cemento Portland. Y que a su vez, también desarrollan mayor resistencia a la corrosión (Shi, Qiang, 2000).

Un estudio que abarcó una extensa revisión bibliográfica sobre las diferentes formas en que se recicla la escoria de acero en distintos países, reportó que la escoria de acero es empleada en mayor proporción en materiales de construcción, producción de cemento y concreto, como adsorbente de metales pesados en plantas de

tratamiento de aguas residuales, para la captura de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y también tiene algunas aplicaciones en la agricultura, como fertilizante (Yi et al., 2012). En la revisión de la literatura resumen algunas de las características de las escorias que analizaron relacionándolas con las aplicaciones comunes de las escorias en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Características y aplicaciones de las escorias de acero (Yi et al., 2012)

Características	Aplicaciones
Duras, resistentes al desgaste, adhesivas	Agregados para carreteras y obras hidráulicas
Porosas y alcalinas	Tratamiento de aguas residuales
Con óxidos de hierro o hierro	Recuperación de hierro
Con CaO, MgO, FeO, MnO	Agentes fundentes
Con compuestos cementantes (C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S y C <sub>4</sub> AF)	Producción de cemento y concreto
Con CaO y MgO	Captura de CO <sub>2</sub> y desulfuración de gases de combustión
Con FeO, CaO y SiO <sub>2</sub>	Materia prima para clínquer de cemento
Con componentes fertilizantes (CaO, SiO <sub>2</sub> , FeO, MgO)	Fertilizantes y remediación de suelos

Como se ha mencionado, la tendencia mundial se enfoca hacia el reciclaje y la reutilización de residuos industriales, así por ejemplo, en Alemania se recicla alrededor del 70 % de la escoria de arco eléctrico, de los cuales el 66 % se reutiliza en el ramo de la ingeniería civil y el 4 % en metalurgia (Geiseler, 1996). Se considera que las escorias negras de horno de arco eléctrico presentan buenas cualidades: Sin embargo se debe tener en cuenta su posible inestabilidad volumétrica, ya que suelen presentar cal libre, magnesia libre, sulfuros, óxidos altos en hierro y manganeso (Frías Rojas et al., 2002).

La proporción de silicatos y aluminatos contenidos en la escoria de acero sufren hidratación después de 90 días de reacción produciendo geles C-S-H y C-S-Al-H, así como Ca(OH)<sub>2</sub>. Sin embargo, las fases de los diferentes óxidos de la escoria (CaO–FeO–MnO–MgO) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>F tienen muy poca participación en las reacciones de hidratación debido a su baja reactividad (Wang, 2010).

En otras investigaciones reportaron que el comportamiento de la velocidad de hidratación de los productos del cemento Portland difiere de la de los productos de la escoria de acero. Esto es porque en la matriz de cemento portland ordinario la

reacción sucede a edades tempranas generando cantidades importantes de productos de hidratación; mientras que en la matriz de escoria la hidratación se desencadena de manera lenta y disminuye gradualmente. Reportaron también, la importancia del tamaño de partícula de escoria de acero ya que a tamaños pequeños (alrededor de 10  $\mu\text{m}$ ) se mejoran las propiedades cementantes y con partículas grandes de esta escoria (alrededor de los 60  $\mu\text{m}$ ) se desempeña como agregado fino (Wang et al., 2011).

Tsaikiridis y otros autores (Tsaikiridis et al., 2008) emplearon 10,5 % de una escoria de horno de arco eléctrico para la fabricación de clínquer para cemento Portland. Dicha escoria presentaba una importante concentración de óxidos de hierro y óxido de calcio de 26,36 % y 35,7 % respectivamente. Mediante difracción de rayos X y microscopía óptica concluyeron que con la inclusión de esta composición de escoria de horno de arco eléctrico no se vieron afectadas las características mineralógicas ni la calidad del clínquer producido.

La alternativa mayor valorada para la reutilización de las escorias blancas, confirmada por experiencias realizadas a escala industrial, es su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga. Para esta alternativa no será necesario un pretratamiento, siempre y cuando se tenga la precaución de no incluir elementos extraños, como trozos metálicos, y los tamaños de las partículas del material sean inferiores a 50 mm. Las escorias blancas presentan en su composición silicatos tricálcico y bicálcico, aluminoferrito tetracálcico, aluminato tricálcico y ferrito dicálcico (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2013).

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

Los fluoruros aparecen en cantidades elevadas (1,4 %), por lo que deberá tenerse en cuenta en la práctica, al influir negativamente en las propiedades del clínquer, así como en las emisiones por razones medioambientales. Los contenidos superiores al

2 % en magnesio pueden ocasionar inestabilidad de volumen por lo que su contenido está limitado por la normativa. Por este motivo el parámetro limitante es el magnesio y va a ser éste el que determine la máxima dosificación (por lo general no mayor del 5 %) (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2013).

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

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

La ausencia de una alternativa de uso, técnica y económicamente viable para las escorias procedentes de la fase de afino o metalurgia secundaria (escorias blancas), ha provocado que el destino final de éstas sean los vertederos. Año tras año, el problema se agrava; planteando dificultades a las empresas generadoras, el medio ambiente y la sociedad en general (Herrero Vázquez, 2015). En este contexto, surge la valorización de la escoria blanca como sustitución parcial, o incluso total, del árido o cemento natural, en la fabricación de morteros y hormigones. Sin embargo, para su normalización de uso en el mercado, es necesaria una mayor investigación orientada a aclarar sus prestaciones tecnológicas, asociadas con su efecto en la matriz cementicias.

### **1.5. Estado actual del uso de las escorias en el mundo**

Las escorias de los Hornos de Arco Eléctrico (HAE), actualmente son utilizadas principalmente en la industria de los materiales de la construcción, donde han alcanzado determinadas aplicaciones; particularmente en Europa, donde se comercializan cementos compuestos de Cemento Portland y escorias. En Argentina se les utiliza como material de relleno en caminos y como capa base en carreteras, debido a su buena resistencia mecánica a la abrasión y al choque, como consecuencia de su gran dureza. En España se le usa como corrector de suelos agrícolas (pH) mejorando las condiciones de cultivo en áreas con cierta acidez

En Rusia se le usa como árido grueso para la confección de hormigones debido a que las escorias fueron enfriadas lentamente, careciendo estas de propiedades hidráulicas, no siendo apropiadas para la elaboración de cementos, siendo su principal campo de aplicación, el de árido para hormigón, donde la cualidad, que en primer lugar se le pide, es la de poseer resistencias mecánicas superiores al mortero en el cual están embebidas y que no se disgreguen cuando el medio ambiente influya sobre ellas.

La empresa ACINOX de Las Tunas fue fundada en 1991 y casi desde su fundación comenzó a utilizar la escoria como solución a muchos de sus problemas internos. En 1993 iniciaron utilizándola como recubrimiento del horno de arco eléctrico, sustituyendo parte del cemento a utilizar como revestimiento del horno, para evitar que el hierro fundido entre en contacto con la chatarra (Boza-Regueira, 2011).

A partir del año 2006 comenzaron a realizar vínculos con otras empresas que se mostraron interesadas en la utilización de este residuo en sus producciones y, en el 2010 (Boza-Regueira, 2011 ; García-Avilés, 2014), basados en investigaciones e ensayos internos de la fábrica, fueron utilizadas una parte de las escorias generadas por la planta en la realización de 5 000 bloques de hormigón, construcción de más de 3 000 m<sup>2</sup> de aceras en el reparto médico del municipio, realización de las Parrilladas del Cornito, la construcción de pisos internos y muros delimitadores en el interior de la acería y la cimentación de cercas en varias instalaciones de la empresa.

### **Conclusiones parciales**

- La reducción del factor de clínquer mediante el empleo de MCS remarca como la alternativa con mayores perspectivas de aplicación a corto y a mediano plazo para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, a la vez que se mantiene la producción de cemento sin grandes costos de capital.
- Dentro de los MCS más utilizados por la industria de la construcción son las escorias de la industria siderúrgica, en particular, las escorias de alto horno.
- La cantidad de escorias generada es un problema ambiental importante por su generación continua y su creciente almacenamiento.

- La valorización de las escorias blancas consiste en su reutilización como materia prima para sustitución de margas en la producción de clínquer. El estudio de escorias blancas como adición al cemento es aún insuficiente, incluso cuando sus propiedades químicas son similares a las escorias de alto horno.
- No se reportan en Cuba la evaluación de las escorias blancas como sustituto parcial de cemento. Sin embargo, poseen un potencial para ser aplicadas como material cementicio suplementario.

**2.**

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

En el presente capítulo se detalla la fase experimental sobre el uso de las escorias blancas como sustituto parcial del cemento Portland.

### **2.1. Diseño de la experimentación**

Se comienza con la selección, toma y preparación de la muestra y su posterior molienda. Posteriormente, se presenta la descripción de las técnicas, métodos y equipos utilizados en la caracterización de la materia prima; que comprende la fluorescencia de rayos X y la difracción de rayos X. Finalmente, se describen los procesos de elaboración de los morteros y los ensayos físicos mecánicos aplicados a estos (Figura 2.1).

De acuerdo con la literatura consultada, las principales pruebas que determinan la utilidad de la escoria como material de construcción son: los ensayos de resistencias mecánicas a probetas elaboradas con dicho material, específicamente la resistencia a la compresión. Para la obtención de los resultados, el método tradicional de experimentación en las investigaciones exploratorias, es el candidato para ser utilizado en este trabajo. El mismo consiste en realizar experimentos en los cuales varía solamente un parámetro, manteniéndose constante todos los demás. De este modo, la variación de las respuestas se puede atribuir entonces a un solo factor. De acuerdo a este fundamento, para el presente estudio se analizará solamente la sustitución parcial del 30 % de cemento Portland P-35 por escoria blanca sobre la resistencia mecánica de los morteros.

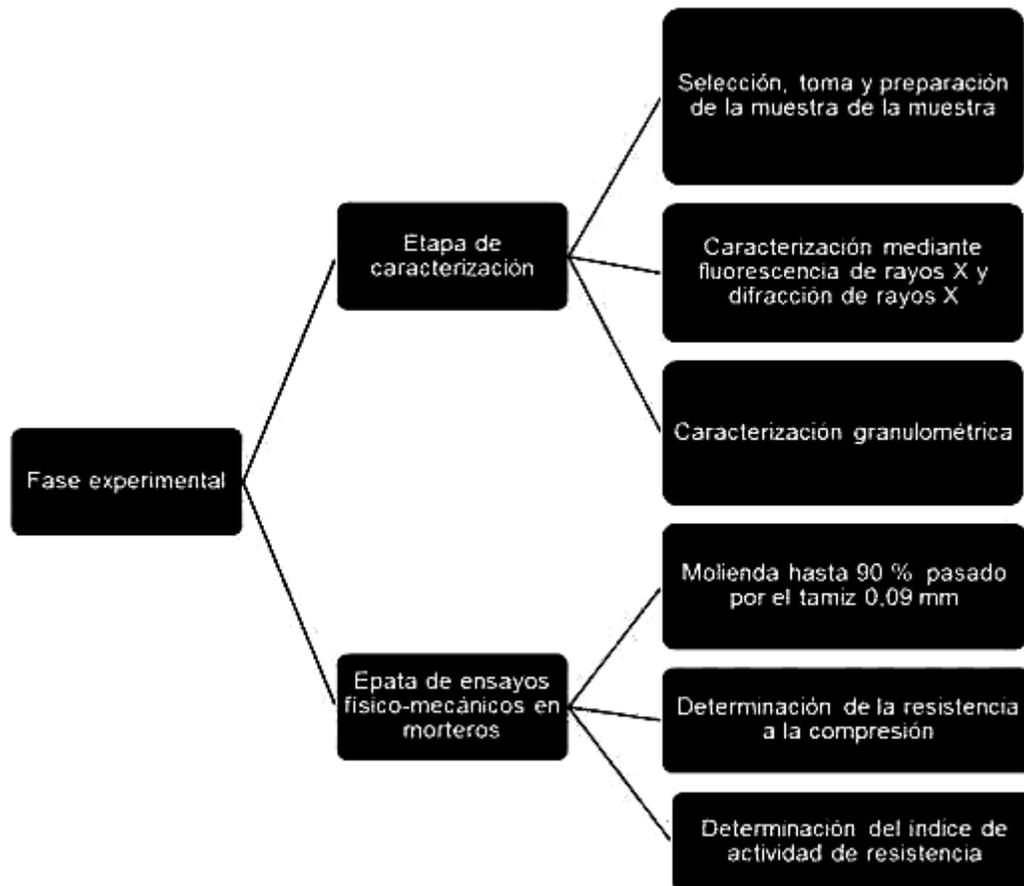


Figura 2.1. Esquema del trabajo experimental

## 2.2. Selección y toma de la muestra

La muestra de escoria blanca fue tomada del área de almacenamiento ubicada en los alrededores de la planta de producción de acero. El muestreo de la escoria se realizó por puntos. La muestra se compuso de tres partes, una tomada en la parte superior, otra en la parte intermedia y la tercera en la parte inferior de la pila de escoria. Para facilitar el muestreo se empleó una tabla que se empujaba horizontalmente dentro de la pila, justamente bajo el punto de muestreo para evitar la posterior segregación. Se separó la capa exterior de la pila y se tomó la muestra de material existente bajo ella con ayuda de una pala. Se tomaron 5 kg de escoria blanca. Todo el material que se logró recopilar fue enviado al laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM) para ser homogenizado, a partir de lo cual se obtuvo cuatro fracciones iguales de muestras, de una fracción se

tomó material para el análisis químico y mineralógico, de la otra parte para los ensayos físico-mecánicos y el material restante fue almacenado como reserva.

### **2.3. Técnicas empleadas en la caracterización de la escoria blanca**

Es importante realizar la caracterización de cualquier muestra; como en este caso, la escoria de horno de arco eléctrico, antes de su utilización como materia prima y de evaluar su incorporación en cualquier matriz. Dentro de lo más importante está la composición química y mineralógica, lo cual depende de su origen, enfriamiento y almacenamiento.

Se realizó un análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), con el objetivo de conocer la composición química de la escoria blanca. Para realizar el análisis por esta técnica fue necesario hacer una pastilla de la mezcla de 10 g de escoria molida con pastillas de cera. Preparada la pastilla de la escoria, ésta fue analizada en un equipo de la marca Axios, con un voltaje de excitación de 4 kW. El equipo de FRX tiene como fuente un tubo rayos X con ánodo de Rh.

Con la finalidad de conocer las fases presentes en la escoria de horno de arco eléctrico, se hizo un análisis de difracción de rayos X. La caracterización de la materia prima por Difracción de Rayos X (DRX) se realizó en un difractómetro X'Pert Pro, bajo las siguientes condiciones: voltaje de excitación de 40 kv y una intensidad de corriente de 40 mA, con un tiempo de barrido de 0,4017 ( $^{\circ}2\theta$ /segundo) en un ángulo inicial ( $2\theta$ ) de  $5^{\circ}$  y final de  $80^{\circ}$ , un tiempo por paso de 90,17 segundos y radiación de Cu. La temperatura para el análisis se fijó en  $25^{\circ}\text{C}$ . Para la interpretación de los difractogramas se empleó el software X'Pert HighScore Plus versión 3.0 del 2011 y base de datos de 2014.

### **2.4. Determinación de la composición granulométrica**

La composición granulométrica es útil para la fabricación de cemento y hormigón porque determina la trabajabilidad de la mezcla y la cohesión de estos en estado fresco, siendo su conocimiento fundamental para la dosificación.

La muestra de escoria sin moler fue analizada mediante análisis de tamices por vía húmeda. La realización de este análisis permite hacer un análisis de la distribución

de las partículas finas presentes en este material, el que desempeña un papel muy importante en las propiedades de los morteros que lo contienen. El análisis granulométrico se desarrolló con las clases de tamaño (+0,40; -0,40 +0,20; -0,20 +0,08; -0,08 +0,04 y -0,04 +0,00 mm).

Las escorias blancas molidas fueron analizadas mediante granulometría láser en un analizador de tamaño de partículas HORIBA LA – 910, cuyo procedimiento se expone a continuación:

- Preparación de la muestra de pulpa que se desea analizar: se pesaron 35 g de escoria blanca, se transfirió a un beaker de 1000 mL y se agitó durante 5 min con el objetivo de homogeneizar la muestra.
- Con una pipeta se tomaron 2 mL y se vertió en el posillo del equipo, donde permaneció durante 5 min, con una agitación de 1000 rpm.
- Todos los datos quedaron registrados en el sistema instalado en la computadora acoplada al analizador de tamaño de partículas, del cual se obtuvieron las curvas características de tamaño de las escorias blancas.

## **2.5. Metodología para la elaboración de los morteros**

En esta sección se explica la segunda etapa de la fase experimental de esta tesis. Esta etapa tiene la finalidad de describir los materiales empleados para la preparación de los especímenes y ensayos de los morteros, para lo cual se especifican las normas y procedimientos que fueron utilizados.

En la investigación las materias primas empleadas para la confección de los morteros son: escoria blanca, arena sílice normalizada, cemento Portland P-35 y agua. La escoria blanca preparada, fue sometida a un proceso de secado durante un tiempo de 10 h en una estufa que se muestra en la Figura 2.2, con intervalo de temperatura de 0 a 115 °C con el objetivo de eliminar el agua externa que contenía la muestra.



Figura 2.2. Estufa Sammer

La escoria blanca seca fue sometida a un proceso de molienda para obtener un tamaño de partículas similar a la granulometría que presenta el cemento Pórtland P-35, material aglomerante de referencia empleado en la investigación. Para ello se empleó el molino de bolas de 19,5 cm de diámetro interior y 24 cm de longitud que se encuentra en el laboratorio de beneficio del ISMM que se muestra en la Figura 2.3. Para cada corrida se introdujo al molino 450 g de escoria y se estableció un tiempo de molienda de 25 minutos para cada corrida con el objetivo de garantizar un porcentaje pasado por el tamiz 0,09 mm de 90 %, lo cual fue evaluado mediante el análisis de tamices por vía húmeda según la norma cubana NC TS 527 (NC TS 527, 2013).



Figura 2.3 Molino de bolas

Se elaboraron un total de 12 morteros, 3 morteros de referencia con 100 % de cemento P-35 y 6 con sustitución parcial del 30 % de cemento P-35 por escoria blanca para ser evaluados a los 3, 7 y 28 días.

Para la mezcla de los morteros de referencia se emplearon; 450 g de cemento; 1350 g de arena sílice normalizada y 225 mL de agua. Para la mezcla de ensayos de los morteros con sustitución de cemento por escoria se empleó 315 g cemento Pórtland P-35 y 135 g de escoria blanca. La dosis de arena y agua fue la misma empleada para la elaboración de los morteros de referencia. En todos los casos se utilizó una relación agua/aglomerante de 0,5 como lo exige la norma cubana NC TS 527 (NC TS 527, 2013).

Los morteros se realizaron en una mezcladora (Figura 2.4) para lograr una buena homogenización. Primeramente, se añadió la arena sílice, luego el cemento, seguido a este la escoria en el caso correspondiente y por último, el agua.

Cada mortero se preparó acorde a la NC TS 527 (NC TS 527, 2013). Se emplearon moldes de 40 x 40 x 160 mm (Figura 2.5), en los cuales se vertió una porción de 300 g de mortero aproximadamente en cada compartimiento del molde, los mismos se ubicaron en la compactadora (Figura 2.6), la cual está programada para 25 golpes suaves con el objetivo de formar una primera capa que se compacte de forma homogénea; luego se vertió el resto del material y se repitió la operación del apisonado, de modo que no afectara la masa del mortero colocado inicialmente. Todas estas operaciones se realizaron siguiendo el procedimiento como lo indica la norma cubana NC TS 527 (NC TS 527, 2013). Los moldes se dejaron 24 horas en un local a una temperatura de 25 °C y 92 % de humedad relativa y pasado este tiempo fueron desmoldados.



Figura 2.4. Mezcladora



Figura 2.5. Moldes para morteros



Figura 2.6. Compactadora

Los morteros una vez que fueron desmoldados se colocaron en una piscina con agua hasta el tiempo de ensayo. Cada ensayo fue realizado a los 3, 7 y 28.

## **2.6. Procedimientos para los ensayos de resistencia mecánica**

Las probetas debidamente elaboradas se sometieron a la determinación de la resistencia a la compresión. Para los ensayos se empleó una prensa hidráulica de 10 t como se muestra en la Figura 2.7. Los valores de resistencia obtenidos en la prensa son expresados en MPa.



Figura 2.7. Prensa hidráulica de 10 t

En el ensayo de resistencia a la compresión, las dos caras de los productos obtenidos en el ensayo de flexotracción se colocan sobre dos cilindros de 10 mm de diámetro para efectuar el ensayo (Figura 2.8). Cada accesorio se colocó sobre la prensa entre los platos de 10 x 10 cm, cuya rótula está centrada sobre el eje de una de las secciones sometidas a compresión.



Figura 2.8. Accesorio para la compresión

### **2.7. Determinación del índice de actividad de resistencia.**

Para la determinación de este índice de actividad se tomaron los resultados de los ensayos de compresión simple a los 7 y 28 días, tanto de los morteros con adición de escoria blanca como de los morteros de referencia. El índice se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$IAR = \frac{A}{B} \cdot 100$$

Donde:

IAR: índice de actividad resistente

A: promedio de la resistencia a la compresión de los morteros de ensayo (puzolana y cemento), MPa.

B: Promedio de la resistencia a la compresión de los morteros patrones (100 % cemento Pórtland), MPa.

El método se recoge en la norma cubana NC TS 527 (NC TS 527, 2013).

### **Conclusiones parciales**

- Las técnicas de caracterización empleadas para la caracterización química y mineralógica son adecuadas para la obtención de resultados confiables en la investigación.
- Los ensayos físico-mecánicos fueron realizados bajo las normas cubanas establecidas para la aplicación como material cementicio suplementario.
- La metodología empleada para la investigación ofrece una vía adecuada para la evaluación de la escoria blanca como material cementicio suplementario.

**3.**

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos, primero en la etapa exploratoria para acondicionar y caracterizar la escoria blanca, y luego, los resultados obtenidos en los ensayos físico-mecánicos realizados en los morteros, como fue la resistencia a la compresión.

#### 3.1. Resultados de la caracterización química

Los resultados de la composición química por FRX se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química de la muestra de escoria blanca

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PPI
Contenido, %	28,06	5,33	2,79	0,55	6,02	56,39	0,07	0,04	0,28	0,03	0,1

Se aprecia que los compuestos que aparecen como principales constituyentes son óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de magnesio y óxido de hierro, y en menores cantidades óxidos de manganeso, sodio, titanio, fósforo y potasio.

Los elevados niveles de óxido de calcio es un indicador de las buenas propiedades de aglomerantes, debido a que este compuesto tiene excelentes propiedades aglomerantes. El relativamente bajo contenido de hierro limita su utilización como corrector de hierro en la producción de clínquer. Sin embargo, podría ser un sustituto de la materia prima calcárea, aportando similares contenidos de componentes químicos que las margas.

Además, se realizó también el cálculo de la pérdida por ignición en una muestra de escoria de la cual se obtuvo 0,1 % en masa. Este es un valor aceptable, ya que la normatividad sugiere que, salvo algunas excepciones, en la calcinación no se pierda una cantidad igual o mayor que el 5 % en peso. La importancia de esta

determinación radica en que un porcentaje elevado indica prehidratación y carbonatación. Esto indica que no hay pérdida de las propiedades cementantes.

Es importante destacar que la composición química de la escoria depende, entre otros factores, del tipo de acero que se fabrica. Las escorias blancas, procedentes de la fase de afino, se caracterizan por su contenido en metales pesados como cromo, zinc y plomo (inferior al 1 %).

Al realizar una comparación de la escoria blanca analizada en esta tesis, con otros análisis químicos de escorias del mismo tipo, reportados en la bibliografía científica, como los referenciados en los antecedentes del capítulo 1, se pudo encontrar que los porcentajes en masa de los elementos expresados en forma de óxidos están dentro del rango determinado para las escorias blancas (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2013). Aunque existe una variación en el contenido de silicio, y esto pudiera ser a consecuencia de las diferencias intrínsecas de cada proceso de producción; como la materia prima, la temperatura y el enfriamiento de las escorias.

La composición promedio de las escorias blancas de la planta de aceros inoxidables de Las Tunas se corresponde con la composición determinada por otras vías en la propia empresa (García-Avilés, 2014).

Tabla 3.2. Composición química promedio de escorias blancas en Europa (Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2013)

<b>Principales óxidos</b>	<b>Intervalo de composición, %</b>
SiO <sub>2</sub>	17,4-19,3
FeO <sub>3</sub>	1,1-3,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2-10,4
CaO	45,3-62,1
MgO	4,5-17,2
MnO	0,0-1,2

Tabla 3.3. Composición química de la escoria blanca de ACINOX-Tunas reportada por García- Avilés (García-Avilés, 2014).

Óxidos	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Contenido, %	24,04	0,80	6,50	57,00	8,06	0,30	0,061	0,024

Tabla 3.4. Composición química promedio de la escoria granulada de alto horno

COMPUESTO	PORCENTAJE (%)
Ca O	38 – 42
SiO <sub>2</sub>	32 – 37
MgO	7 – 9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 – 14
S	< 1
Fe O	0,4 – 0,8
Mn O	0,2 – 0,6
TiO <sub>2</sub>	0,3 – 0,5

Las escorias de Alto Horno pueden ser agregada hasta el 70 % es en caso excepcional solo cuando tiene alto contenido de sílice reactiva y alúmina, esto favorece la reactividad de estos con los productos de hidratación del cemento, en su utilización solo se emplean en estructuras que no exijan elevada resistencia, sin embargo las escorias de (HAE) tienen menos contenido de sílice reactiva y alúmina. Estas escorias de Alto Horno tienen mayor superficie específica por la forma casi esférica que tienen las partículas por lo que tienen mayor capacidad de reaccionar con las fases de hidratación del cemento que no es el caso de la escoria blanca.

### 3.2. Composición mineralógica de la muestra natural

Las principales fases minerales identificadas por DRX en la escoria blanca son silicato de calcio, óxido de silicio, óxido de titanio y magnesio, silicato de magnesio y hidrosilicato de calcio y aluminio. El elevado contenido de silicatos de calcio, productos de elevadas propiedades aglomerantes, confirma la hipótesis de los resultados del análisis químico. En la Tabla 3.4 se presentan las fases identificadas y en la Figura 3.1 se representa el difractograma de la muestra de escoria.

Tabla 3.5. Composición mineralógica de la muestra de escoria blanca

Nombre del compuesto	Fórmula química	Contenido de la fase, %
Silicato de calcio	$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$	43
Óxido de silicio	$\text{SiO}_2$	15
Óxido de titanio y magnesio	$\text{Mg}(\text{Mg}_{0.926} \text{Ti}_{0.074})$ $(\text{Mg}_{0.074} \text{Ti}_{0.926})\text{O}_4$	7
Silicato de magnesio	$\text{MgSiO}_3$	6
Hidrosilicato de calcio y aluminio	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	29

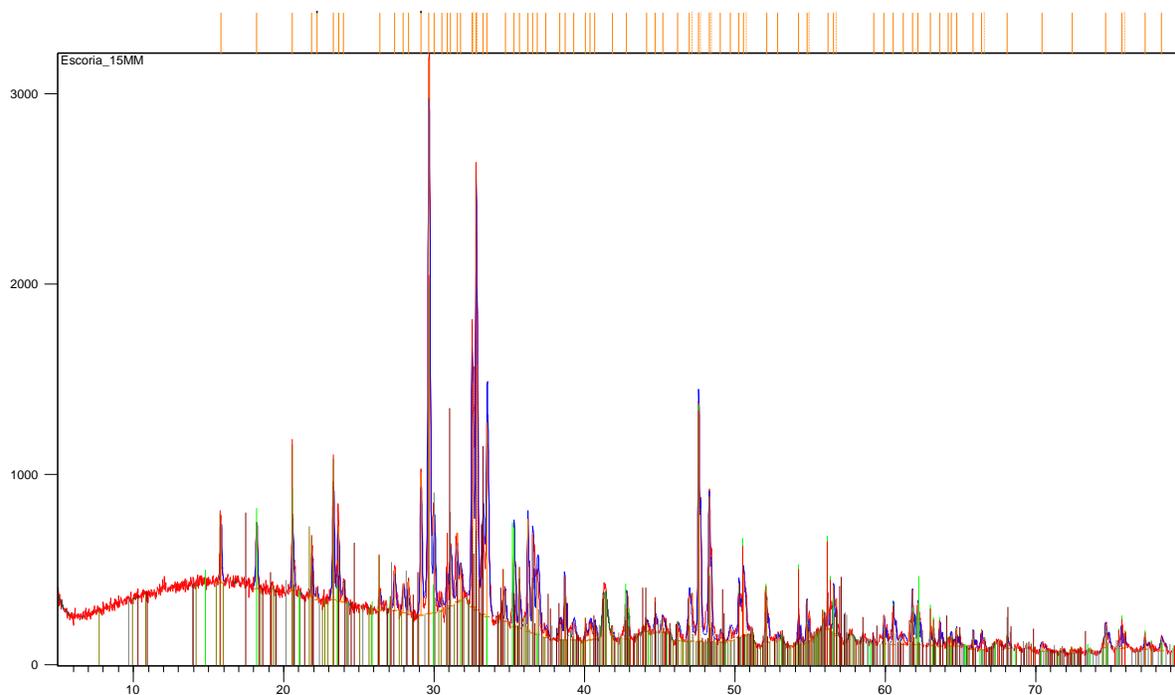


Figura 3.1 Diffractograma de la muestra de escoria blanca

### 3.3. Composición granulométrica

Como se puede apreciar en la Figura 3.2, el material presenta aproximadamente 30 % por debajo del tamiz 0,09 mm, siendo esto favorable. Aunque para emplearlo

como material cementicio suplementario se requiere que el 90 % pase por ese tamiz. Es por ello que el material fue molido hasta obtener más del 90 % del material cernido por el tamiz 0,09 mm (Figura 3.3).

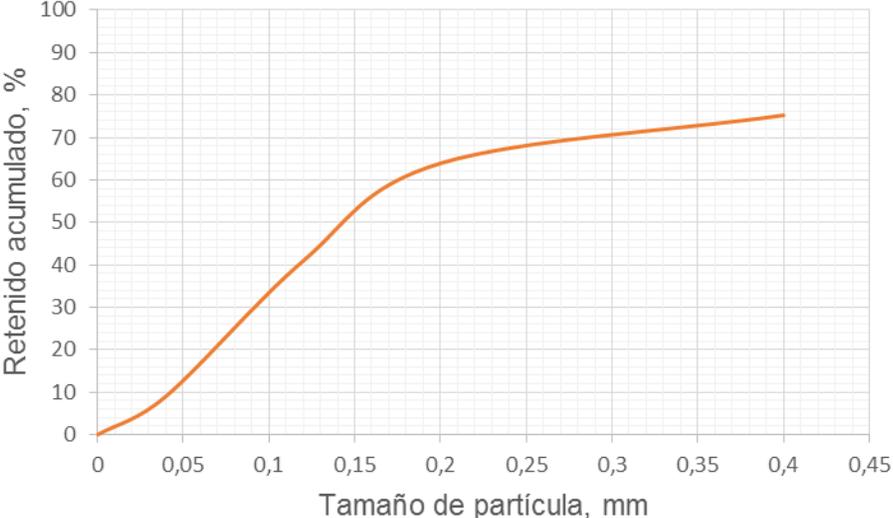


Figura 3.2. Característica de tamaño de la escoria blanca sin moler

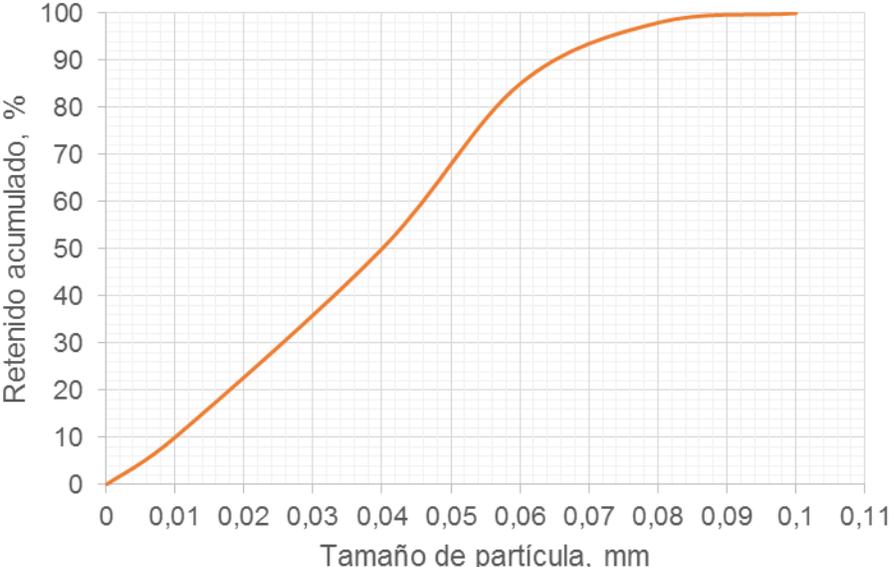


Figura 3.3. Característica de tamaño de la escoria blanca molida

### 3.4. Resultados de la caracterización físico-mecánica en morteros

En la tabla 3.5 se muestran los resultados promedios de la resistencia a la compresión para los morteros patrones y morteros donde fue sustituido el 30 % de cemento por escoria blanca.

La resistencia desarrollada por los morteros con escoria blancas es menor para todas las edades que la de los morteros patrones (Figura 3.4). Esto es una característica de los morteros con adición de este tipo de materiales cementicios suplementarios. La proporción de silicatos y aluminatos contenidos en la escoria de acero muestra mayor resistencia después de los 90 días de reacción produciendo geles C-S-H y C-S-Al-H, así como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , por debajo de esta edad tiene poca participación en las reacciones de hidratación debido a su baja reactividad (Wang, 2010).

A partir de estos datos de la Tabla 3.5 se calculó el índice de actividad de resistencia. Se observa que el índice de actividad de resistencia se incrementa en el tiempo. Las series de morteros con incorporación de escoria blanca cumplen con las especificaciones establecidas por la NC TS 528 (NC TS 528:2013, 2013) a los 7 y 28 días, con valores superiores a los 75 % (Tabla 3.6).

Los resultados a 3 días no deben tomarse como criterios inequívocos sobre la reactividad de las escorias, debido a que a edades tempranas predomina el efecto *filler* sobre la contribución de los materiales cementicios suplementarios a la resistencia mecánica (Cyr et al., 2006).

La evolución de la resistencia para las tres edades de ensayo se corresponde al comportamiento de un cemento PP-25, de acuerdo a las especificaciones de la NC-96 (NC 96: 2011, 2011).

Tabla 3.6. Resistencia a la compresión de los morteros

Materiales ensayados	Resistencia a la compresión, MPa		
	3 días	7 días	28 días
Patrón de Referencia	18	27	39

Morteros con sustitución de 30 % de cemento P-35 por escoria blanca	12	22	33
---	----	----	----

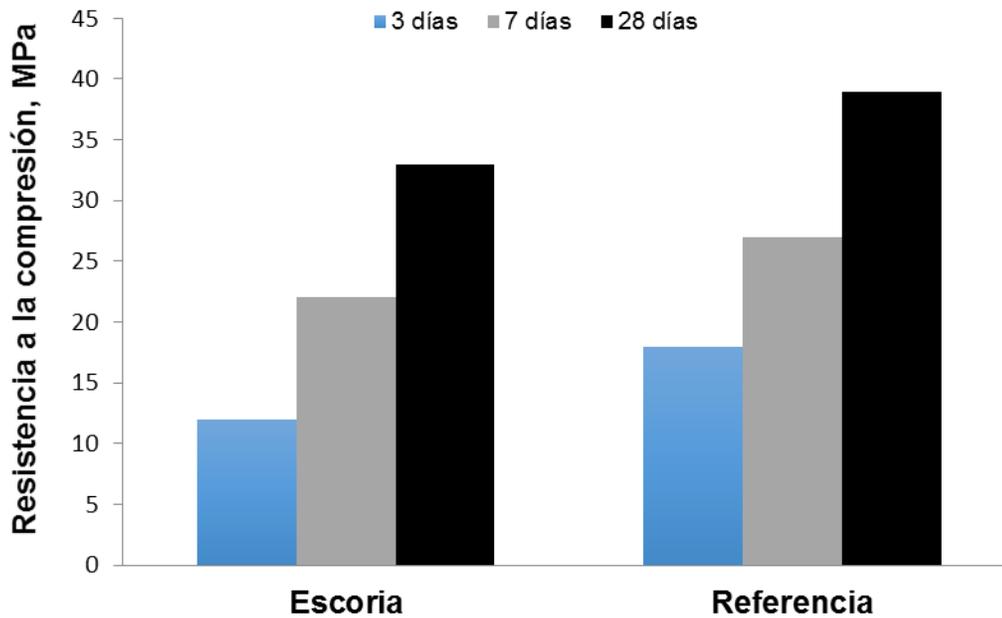


Figura 3.4. Resistencia a la compresión de los morteros con 30 % de escoria blanca

Tabla 3.7. Índice de actividad de resistencia de los morteros con escoria blanca

Edades de ensayo	Índice de actividad de resistente (IAR)
3 días	67
7 días	81
28 días	85

### 3.5. Valoración socioeconómica y ambiental

El presente trabajo constituye un paso importante para el desarrollo de nuevos materiales, que no han sido valorizados de manera que permita orientar su desarrollo de acuerdo con las condiciones establecidas para su uso. Esto, unido al déficit de materiales de construcción para acometer los diferentes programas de construcción, resalta la importancia de esta investigación.

Se ha podido constatar de manera particular que en Cuba existen, posibilidades de reciclar desechos de las industrias siderúrgicas y revalorizarlos para su uso en la

construcción, donde la valoración técnica preliminar ha resultado positiva. Esto debe hacerse con un enfoque local, lo que podría resultar de un impacto importante para estas comunidades y la disminución del impacto ambiental provocado por la deposición de escorias.

Con los resultados obtenidos del trabajo y con el objetivo de tener una idea acerca de los aportes económicos de estos por concepto de sustitución de cemento por escorias blancas; se tiene en cuenta lo siguiente:

El precio del cemento en la actualidad es alrededor de los 200 pesos la tonelada. Por lo cual, si se sustituye cemento por escoria, de acuerdo al porcentaje estudiado, por cada 700 kg de cemento se puede incorporar 300 kg de escoria blanca, lo que se traduce en que por cada tonelada se ahorraría 60 pesos por concepto de compra de cemento, a la vez que se puede incrementar las aplicaciones. De forma general los resultados son alentadores, de ahí la necesidad de continuar el estudio de estos materiales y fundamentar la viabilidad económica de su procesamiento.

Por otro lado, el empleo de escorias contribuye al ahorro de un volumen importante de recursos minerales. La posibilidad de efectuar una producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros de producción de cemento, contribuye al desarrollo de nuevas producciones de la industria local, a obtener bajos costos de producción en comparación con la producción de cemento Portland y propiciar el comercio local del producto.

Otro aspecto que pudiera hacerse referencia, es la racionalidad de explotar integralmente estos residuos, con la posibilidad de realizar producciones variadas en la industria de materiales de la construcción, dentro de las cuales se pueden mencionar la producción bloques huecos, tejas, entre otros.

## **Conclusiones parciales**

- La escoria blanca estudiada presenta una composición química adecuada para ser considerada con potencial para su evaluación como material cementicio suplementario.
- Las principales fases minerales identificadas son silicato de calcio, óxido de silicio, óxido de titanio y magnesio, silicato de magnesio e hidrosilicato de calcio y aluminio.
- Según la resistencia a la compresión de los morteros adicionados, tanto para los 7 como para los 28 días, arroja un índice de actividad de resistencia superior al 75 % que es el valor mínimo exigido por la norma para considerar un material con posibilidades de ser adicionado al cemento o al hormigón.

## CONCLUSIONES

Se especifica que las conclusiones que a continuación se presentan fueron obtenidas bajo las condiciones de los objetivos establecidos, con los materiales utilizados propuestos y el programa experimental que se estableció para este trabajo de investigación:

- Los resultados de la composición química de la muestra de escoria blanca muestran que es un material con alto contenido de CaO, lo cual es un indicador de sus propiedades hidráulicas y se encuentra en el intervalo de la composición química de materiales de este tipo, trabajados y reconocidos como material cementicio suplementario.
- Las principales fases minerales identificadas por DRX en la escoria son silicato de calcio, hidrosilicato de calcio y aluminato, silicato de magnesio y óxido de silicio. Los mayores contenidos lo representan los silicatos de calcio, productos de elevadas propiedades aglomerantes.
- El índice de actividad de resistencia a los 7 y 28 días es superior a 75 %, que es el mínimo requerido para que el material pueda ser utilizado como material cementicio suplementario. Los morteros se comportan como un PP-25, de acuerdo a las especificaciones de la NC-96.
- La escoria blanca de acería de la Empresa de Aceros Inoxidables de Las Tunas se puede considerar como un material cementicio suplementario capaz de sustituir 30 % de cemento P-35, para proporcionar un aglomerante con resistencia similar a un cemento PP-25.

## **RECOMENDACIONES**

- Estudiar con técnicas adecuadas el mecanismo de la reacción de las escorias blancas en la matriz cementicia.
- Formular diferentes tipos de morteros a partir de los materiales estudiados.
- Evaluar el uso de estas escorias en la producción de hormigones.
- Llevar a cabo monitoreo de la estabilidad de volumen a edades avanzadas, teniendo en cuenta el relativamente elevado contenido de MgO.
- Hacer investigaciones para comprobar los costos ambientales y financieros para reutilizar determinados porcentajes de escoria dentro de una matriz cementante.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ACI, 2000. Cement and concrete terminology. ACI-116R. Detroit, USA : American Concrete Institute.
- ACI, 2001. Cementitious materials for concrete. ACI Educational Bulletin E3-01. Farmington Hills, Michigan, USA. Committe E-701, American Concrete Institute.
- AMARAL DE LIMA, Luciana, 1999. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. 1999. S.I. : Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- BOZA-REGUEIRA, Maile, 2011. Utilización de las escorias de acería como material de construcción. In : Ciencia & Futuro. 2011. Vol. 1, nº 4, p. 31- 40.
- CUÁSQUER, C. J. et ALTAMIRANO, S. I., 2015. Evaluación del uso de escorias de acero en la producción de hormigón. Tesis de Ingeniería. Sangolquí, Ecuador : Universidad de las Fuerzas Armadas.
- CYR, R, LAWRENCE, P et RINGOT, E, 2006. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. In : Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36, nº 2, p. 264- 277. DOI 10.1016/j.cemconres.2005.07.001.
- DAMINELI, B L, PILEGGI, R G, JOHN, Vanderley M, PACHECO-TORGAL, F, JALALI, S, LABRINCHA, J et VANDERLEY, V M, 2011. Lower binder intensity eco-efficient concretes. In : Eco-efficient concrete. S.I. : Woodhead publishing. p. 20.
- DAMTOFT, J S, LUKASIK, J, HERFORT, D et SORRENTINO, D, 2008. Sustainable development and climate change initiatives. In : Cement and Concrete Research. 2008. Vol. 38, p. 115- 127. DOI 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.
- FERNÁNDEZ-RUIZ, Alejandro., 2015. ESTUDIO PRELIMINAR DEL USO DE ÁRIDOS SIDERÚRGICOS COMO LASTRE DE LOS MOLINOS DE VIENTO.

- Tesis de Ingeniería. Barcelona, España : Universidad Politécnica de Cataluña.
- FRÍAS ROJAS, M., SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I. et URÍA, A., 2002. Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico. In : Materiales de construcción. 2002. Vol. 267, p. 79- 83.
- GARCÍA-AVILÉS, Emlio., 2014. Escorias blancas de acerías como material de construcción. Trabajo de Diploma. Moa, Cuba : Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- GARTNER, Ellis, 2004. Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. In : Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34, p. 1489- 1498.
- GARTNER, Ellis et HIRAO, Hiroshi, 2015. A review of alternative approaches to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. 2015. S.l. : s.n. ISBN 0008-8846.
- GEISELER, J, 1996. Use of steelworks slag in Europe. In : Waste Management. 1996. Vol. 16, p. 59- 63.
- HERRERO VÁZQUEZ, Tamara, 2015. Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA: aplicación en pastas y morteros de cemento. Tesis Doctoral. País Vasco, España : Meatze eta Metalurgia Ingeniaritza eta Materialen Zientzia.
- HUMPHREYS, K et MAHASENAN, M, 2002. Toward a Sustainable Cement Industry. Substudy 8: climate change. Geneva, Suiza.
- JUENGER, M.C.G., PROVIS, J.L., ELSEN, J., MATTHES, W., HOOTON, R.D., DUCHESNE, J., COURARD, L., HE, H., MICHEL, F., SNELLINGS, R. et DE BELIE, N., 2012. Supplementary cementitious materials for concrete: characterization needs. In : Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Cambridge, Reino Unido : Cambridge University Press. 2012. p. imrc12-1488.
- KOCABA, Vanessa, GALLUCCI, Emmanuel et SCRIVENER, Karen L, 2012. Methods

for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes. In : Cement and Concrete Research [en ligne]. 2012. Vol. 42, n° 3, p. 511- 525. DOI 10.1016/j.cemconres.2011.11.010. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.010>.

LOSÁÑEZ, M, 2005. Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil. Tesis de Ingeniería. País Vasco, España : Universidad del País Vasco.

LOTTHENBACH, Barbara, SCRIVENER, Karen et HOOTON, R D, 2011. Supplementary cementitious materials. In : Cement and Concrete Research [en ligne]. 2011. Vol. 41, n° 12, p. 1244- 1256. DOI 10.1016/j.cemconres.2010.12.001. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

LUXÁN, M P, 1995. Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, como material utilizable en la construcción. I. Caracterización previa de las escorias. Madrid, España.

MARTIRENA, J F, 2004. Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis Doctoral de Segundo Grado. Santa Clara, Cuba : Universidad Central « Marta Abreu » de Las Villas.

MARTIRENA, J F, MIDDENDORF, B, GEHRKE, M et BUDELMANN, H, 1998. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. In : Cement and Concrete Research. 1998. Vol. 28, n° 11, p. 1525- 1536.

NC 96: 2011, 2011. Cemento con adición activa. Especificaciones. In : [en ligne]. La Habana, Cuba. 2011. Disponible à l'adresse : [www.nc.cubaindustria.cu](http://www.nc.cubaindustria.cu).

NC TS 527, 2013. Cemento hidráulico-Métodos de ensayo-Evaluación de las puzolanas. In : [en ligne]. La Habana, Cuba. 2013. Disponible à l'adresse :

www.nc.cubaindustria.cu.

NC TS 528:2013, 2013. Cemento hidráulico - Puzolanas- Especificaciones. In : [en ligne]. La Habana, Cuba. 2013. Disponible à l'adresse : www.nc.cubaindustria.cu.

PAPADAKIS, V G et TSIMAS, S, 2002. Supplementary cementing materials in concrete Part I : efficiency and design. In : Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32, p. 1525- 1532. DOI S0008-8846(02)00827-X.

PURNELL, Phil, 2013. The carbon footprint of reinforced concrete. In : Advances in Cement Research. 2013. Vol. 25, n° 1, p. 1–7. DOI <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.13.00013>.

RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar, 2014. Cement Replacement Materials. Properties, Durability, Sustainability. Heidelberg/ New York/ Dordrecht/ London, Netherlands : Springer-Verlag Berlin Heidel. ISBN 978-3-642-36721-2.

REN, Q. et WANG, Y., 2012. Technologies of steel slag and comprehensive utilization of resources. In : Iron Steel Research. 2012. Vol. 1, p. 54- 71.

RODRÍGUEZ, A, 2008. Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción. Tesis de Ingeniería. Burgos, España : Universidad Politécnica de Burgos.

SCRIVENER, Karen L, 2014. Options for the future of cement. In : The Indian Concrete Journal. 2014. Vol. 88, n° 7, p. 11- 21.

SERRATO, L. M., 2014. Utilización de escoria de horno de arco eléctrico en morteros a base de cemento Portland. Tesis de Maestría. Nuevo León, España : UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

SHEN, H. et FORSSBERG, E., 2013. An overview of recovery of metals from slags. In : Waste Management. 2013. Vol. 23, p. 933–949.

SHI, C. et QIANG, J., 2000. High performance cementing materials from industrial

- slags - a review. In : Resources, Conservation and Recycling. 2000. Vol. 29, p. 195–207.
- SNELLINGS, Ruben, 2011. Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites. Tesis Doctoral. Heverlee, Bélgica : Katholieke Universiteit Leuven.
- SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL, 2013. ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO. Bilbao, España.
- TAYLOR, Michael, TAM, Cecilia et DOLF, Gielen, 2006. Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry. In : Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry. Paris, Francia : IEA-WBCSD. 2006. p. 12.
- TEKLAY, Abraham, YIN, Chungen, ROSENDAHL, Lasse et BØJER, Martin, 2014. Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. In : Cement and Concrete Research. juillet 2014. Vol. 61, p. 11-19. DOI 10.1016/j.cemconres.2014.04.002.
- TOLEDO FILHO, R.D., GONÇALVES, J.P., AMERICANO, B.B. et FAIRBAIRN, E.M.R., 2007. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. In : Cement and Concrete Research. 2007. Vol. 37, n° 9, p. 1357-1365. DOI 10.1016/j.cemconres.2007.06.005.
- TSAKIRIDIS, P.E., G.D., Papadimitriou et TSIVILIS, S., 2008. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. In : Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 152, p. 805–811.
- WANG, Q., 2010. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. In : Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24, p. 1134–1140.
- WANG, Q., YAN, P. et FENG, J., 2011. A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral composition. In : Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 186, p. 1070-1075.

WBCD - CSI, 2012. Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. Emissions Monitoring and Reporting\_Version 2.0 [en ligne]. Brussels, Belgique. Disponible à l'adresse : [www.wbcdcement.org](http://www.wbcdcement.org).

WBCSD, 2015. Low carbon technology partnerships initiative (LCTPi) [en ligne]. Geneve, Suiza. Disponible à l'adresse : <http://www.lctpi.wbcdservers.org/>.

WBCSD/IEA, 2009. Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050 [en ligne]. Paris, France. IEA Publications. Disponible à l'adresse : <http://www.iea.org/papers/2009/>.

YI, H., XU, G., CHENG, H., WANG, J., WAN, Y. et CHEN, H., 2012. An overview of utilization of steel slag. In : Procedia Environmental Sciences. 2012. Vol. 16, p. 791-801.