



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

ESCORIAS BLANCAS DE ACERÍA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y
MATERIALES**

Emilio Garcia Avilés

**MOA
2014**



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

ESCORIAS BLANCAS DE ACERÍA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y
MATERIALES**

Autor: Emilio Garcia Avilés.

Firma _____

Tutores:

Dr. C. Pedro Enrique Beyris Mazar.

Firma _____

Ing. Gualberto Rosales Martín.

Firma _____

**MOA
2014**

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A través de este trabajo hago constar mis mayores agradecimientos:

...A mis queridos padres Eloy Garcia Castro y Obdulia Avilés Díaz por confiar en mí y darme aliento para seguir adelante en toda la etapa de estudiante.

...A mis hermanos por su inmenso amor y dedicación.

...A mi novia, por su incalculable ayuda y confianza.

...A Juana y Antonio por abrirme las puertas de su casa y acogerme como un hijo.

...A mis tutores Gualberto Rosales Martín y Pedro E Beyris Mazar, por toda su ayuda en la realización de este trabajo.

...A los profesores del Departamento de Metalurgia que me han ayudado.

...A mis amigos y compañeros de escuela por su reiterado apoyo incondicional.

...A todos los que de una forma u otra han tenido que ver en la realización de este trabajo.

...A mi patria cubana, por permitir realizarme hoy como profesional.

DEDICATORIA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos mis amigos y compañeros de aula que de cierta forma me ayudaron a hacer realidad este sueño.

....A mi querida madre y mi querido padre por su amor, confianza y sacrificio durante todos estos años de estudios.

....A mi hermano Eloy, por su apoyo y entera confianza en que yo si podía realizar mi sueño.

....A mis hermanas Osleidis y Elisdania, por su inmenso cariño.

....A toda mi familia que ha sido clave durante este período.

....A mi novia (Evelin), por su amor y apoyo en todo momento.

RESUMEN

RESUMEN

En la planta siderúrgica de Las Tunas, ACINOX, se generan grandes volúmenes de escorias blancas que son almacenadas en el vertedero de la entidad creando una situación ambiental desfavorable. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la utilización de la escoria blanca generada en ACINOX-Las Tunas como aditivo en las mezclas de morteros y hormigón, como una alternativa en la industria de materiales de la construcción. Para ello se realizó una caracterización, basada en la determinación de la composición química, por el método de fluorescencia de rayos X, la caracterización granulométrica mediante un juego de tamices y las propiedades físico-mecánico mediante ensayos mecánicos. En las mezclas diseñadas se sustituyó la escoria blanca por cemento en 10, 20, 30, 40 y 50 % para los morteros y un 15 % en hormigones. Mediante los ensayos de resistencia mecánica realizados a los 28 días en los morteros, se obtuvieron los valores de resistencia a la compresión para los patrones de 5,2 MPa y para los morteros con las dosificaciones ya mencionada de 5,2; 4,2; 3,3; 2,4 y 1,9 MPa, respectivamente. Los hormigones patrones poseían valores de resistencia a la compresión de 10; 15; 20; 25 y 30 MPa; mientras que los que poseían un 15 % de escoria 12,8; 17,3; 22,2; 27,0 y 32,1 MPa, respectivamente, permitiendo disminuir el consumo de cemento en las mezclas estudiadas.

SUMMARY

SUMMARY

In the metallurgical steel plant of Las Tunas, ACINOX, large volumes of white slag, which are generated and are stored in dumps, which create an unfavourable environmental situation. The present investigation has the objective of evaluating the utilization of white slag generated by ACINOX-Las Tunas as an additive in concrete and cement mixtures, as and as an alternative in the construction material industry. A characterization based on the determining the chemical composition by using the X-Ray fluorescence method, on grain size by means of utilizing a set of sieves and on the physic-mechanical properties through the use of compression tests were carried out. In the mixtures prepared the white slag with different compositions of white slag from 10, 20, 30, 40 and 50 % for cement mixers and 15 % for concrete. Through mechanical tests carried out in 28 days in the cement mixers, compression resistance values were obtained for a patron of 5,2 MPa and for mixers with the following dosages of 5,2; 4,2; 3,3; 2,4 and 1,9 MPa, respectively. The concrete patrons possessed compression resistance values of 10, 15, 20, 25 and 30 MPa while those that possessed a 15 % of slag 12,8; 17,3; 22,2; 27 and 32,1 MPa, respectively, allowing to decrease the cement consumption in the studied mixtures.

ÍNDICE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE.....	6
1.1 Generalidades	6
1.2 Ejemplos de materiales residuales	9
1.3 Caracterización de las escorias	10
1.4 Estado del arte.....	13
1.5 Experiencias locales sobre el uso de las escorias como material de la construcción	18
1.6 Conclusiones parciales	18
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.1 Diseño de la investigación	20
2.2 Diseño de experimento	20
2.3 Toma y preparación de la muestra	21
2.4 Determinación de la composición química.....	23
2.5 Determinación de la composición granulométrica	24
2.6 Preparación de mezclas y confección de probetas.....	24
2.6.1 Preparación de las mezclas y confección de las probetas de mortero	25
2.6.2 Preparación de las mezclas y confección de las probetas de hormigón.....	27
2.7 Determinación de las resistencias mecánicas	30

2.7.1 Determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión en morteros.....	30
2.7.2 Determinación de la resistencia a la compresión en hormigón ...	32
2.8 Conclusiones parciales	34
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	35
3.1 Resultados experimentales y su análisis	35
3.1.1 Composición química	35
3.1.2 Composición granulométrica	36
3.1.3 Resistencias mecánicas	37
3.1.3.1 Resultados obtenidos en los ensayos a los morteros	38
3.1.3.2 Resultados obtenidos en los ensayos al hormigón	41
3.2 Conclusiones parciales	42
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	45

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En Cuba, la situación de la vivienda, junto a la necesidad de desarrollar otras obras sociales es un problema que crece cada vez más, visto principalmente por el deterioro constante de las ya existentes y el azote de fenómenos naturales que sin duda, han puesto en desventaja las posibilidades de una respuesta rápida a tal problema, debido a la notable escasez de materiales de construcción a partir de las fuentes ya identificadas.

Una manera de compensar este déficit es mediante el aprovechamiento de potencialidades nacionales para la obtención de aditivos, que permitan incrementar los volúmenes y en la medida de lo posible la calidad del cemento. Una de estas potencialidades lo constituyen los residuos de las industrias metalúrgicas.

Los residuos industriales aumentan continuamente en el tiempo y la reutilización de estos materiales residuales han ganado importancia en todo el mundo. Se puede pensar que todos los residuos son aptos para ser reutilizados, sin embargo, la utilización de estos depende que sea competitivo económicamente con el material natural alternativo y conveniente para los propósitos planeados, es decir que su estabilidad y durabilidad sobre la esperada vida útil, pueda ser asegurada dentro del contexto de la aplicación planteada.

Según Bogachkov (2001), uno de los principales residuos de la producción metalúrgica son las escorias, que no son más que un subproducto de la fabricación de los aceros y otros metales.

En la planta de aceros inoxidables de Las Tunas, ACINOX, se vierten diariamente las escorias resultantes de su proceso de productivo, almacenándose en depósitos y constituyendo un factor contaminante del medio ambiente. La escoria que se genera constituye una fuente de materia prima que actualmente no es aprovechada en la

industria nacional y que en estos tiempos donde las reservas naturales se agotan cada vez más y se hace necesario el ahorro de energía debido a los altos precios del petróleo en el mercado mundial, es fundamental evaluar las vías para su explotación y consumo.

Lo anterior indica la siguiente **situación problemática**: la acumulación de grandes volúmenes de escoria blanca generada por la planta ACINOX-Las Tunas durante el proceso productivo y su limitado grado de reutilización, comportándose así como un contaminante del medio ambiente.

Por lo antes expuesto se identifica como **problema**: insuficiente conocimiento de la utilización de la escoria blanca de acería como material de construcción en la fabricación de morteros y hormigón, en sustitución de sus similares.

El **Objeto a investigar** lo constituye: las mezclas de morteros y hormigón con la adición de la escoria blanca generada durante la etapa de afino en el horno cuchara de ACINOX-Las Tunas.

El **Objetivo general** es: evaluar la utilización de la escoria blanca generada en ACINOX-Las Tunas como aditivo en las mezclas de morteros y hormigón, como una alternativa en la industria de materiales de la construcción.

Objetivo específico

- Caracterizar la escoria blanca en cuanto a: granulometría, ensayos químicos y físico- mecánicos.
- Establecer las mezclas y dosificaciones más adecuadas, cuyas propiedades cumplan con las exigencias de las normas cubanas.
- Realizar ensayos mecánicos a los morteros y hormigones a las edades de ensayos.
- Valorar los resultados de acuerdo a las normas cubanas.

Tareas de la investigación:

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con la utilización de la escoria como material de construcción.

- Toma de muestras y su preparación.
- Determinar la composición química.
- Determinación de la composición granulométrica.
- Establecer las mezclas y dosificaciones más adecuadas, cuyas propiedades cumplan con las exigencias de las normas cubanas.
- Realizar los ensayos de resistencia a la compresión y flexión a los 7, 14 y 28 días para los morteros y a los 7 y 28 días el hormigón.
- Evaluación de los resultados obtenidos para determinar las dosificaciones más adecuadas.

Hipótesis

Si se determina que, el comportamiento de las propiedades físico–mecánicas de las mezclas diseñadas con escoria blanca, cumple con las exigencias de las normas cubanas; se podrá utilizar como material de construcción e incidir sobre el desarrollo local sostenible.

Campo de acción

- Propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de morteros y hormigón con adición de escoria blanca.

Aportes que se esperan de la investigación

En el aspecto tecnológico:

- La incorporación de un nuevo agregado a las mezclas de morteros y hormigón.
- Abrir el campo de aplicación de las escorias blancas, para ser empleada como sustituyente parcial del cemento en la provincia de Las Tunas y que puedan ser ensayadas y evaluadas para todo tipo de aplicaciones.

En lo metodológico:

- Establecer un método de trabajo para el desarrollo de investigaciones para materiales alternativos en la construcción.

- Proporcionar a la industria de materiales de la construcción, una base de datos que proporcione las dosificaciones y mezclas a realizar, para elaborar morteros y hormigón con escoria blanca.

El aporte social del trabajo se aprecia en:

- La posibilidad real de la industria y para la población de utilizar un material existente en la localidad, para el desarrollo de las construcciones locales de viviendas y otros tipos de construcciones donde sea posible su empleo.

En lo económico:

- Se propone el reciclaje de un nuevo material, como agregado en las mezclas, que disminuye el consumo de cemento.
- El material no requiere de elevados costos de preparación para su utilización.

En el aspecto ambiental:

- El empleo a escala industrial de las escorias blancas, permitirá eliminar, en un tiempo relativamente corto, un contaminante que por décadas ha sido depositado en el vertedero de la empresa.

Métodos utilizados durante la investigación

1. Métodos teóricos

Inducción – Deducción: Permite reflexionar y generalizar, acerca de los principales problemas que trae la escoria blanca generada por el horno cuchara y su utilización en la industria de materiales de construcción.

Análisis y síntesis: Para analizar los fundamentos teóricos de los procesos que se estudiaron, determinar sus limitaciones y cómo superarlas a través de la identificación de los elementos que los conforman.

Histórico lógico: Para precisar la evolución histórica de la utilización de las escorias de acerías.

Estadístico porcentual: Se utilizó para determinar los porcentajes de los resultados obtenidos.

2. Métodos empíricos

Observación participante: Fue necesario para corroborar las necesidades de eliminar el depósito de escoria blanca generada por el horno cuchara.

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se realiza un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada, con el objetivo de disponer de los elementos básicos para la realización del presente trabajo. Se expone el estado del arte, la conceptualización y consideraciones teóricas sobre las escorias.

1.1 Generalidades

Se consideró oportuno definir los términos y definiciones empleados en la realización de este trabajo para establecer así los elementos básicos que se relacionan según el vocabulario utilizado en la bibliografía consultada.

Las definiciones de **hormigón, cemento, mortero y áridos** que se reflejan a continuación fueron tomadas de (Jiménez et al. 1982).

El **hormigón**, también denominado concreto en algunos países, es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro aglomerante) con áridos (grava, gravilla, arena) y agua.

Por su parte se denomina **mortero** a la mezcla de cemento con arena y agua.

El **cemento**, con propósitos constructivos, puede ser descrito como un material calcáreo y silíceo capaz de unir las piedras, la arena, los ladrillos, o bloques. Los cementos de interés en la fabricación de concreto tienen la característica de fijarse y endurecerse debajo del agua, en virtud de una reacción química con ella y ser, por lo tanto, llamados cementos hidráulicos.

Los **áridos** son aquellos materiales granulares adecuados para su uso en hormigones y morteros. Pueden ser naturales, artificiales o reciclados a partir de materiales previamente utilizados en la construcción.

Los áridos se dividen en dos tipos fundamentales, el árido grueso o grava y el árido fino o arena, los cuales, aunque no contribuyen de manera activa al endurecimiento del mortero deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se le exige al hormigón.

Existen tres factores que intervienen en una granulometría adecuada de los áridos: el tamaño máximo del árido, la compactación y el contenido de granos finos. Cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menores serán las necesidades de cemento y de agua, aunque el tamaño máximo está limitado por otros factores. En cuanto al contenido de granos finos, estos hacen la mezcla más manuable pero precisan más agua de amasado y de cemento.

El **agua** de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo. Puede estimarse que cada litro de agua de amasado de exceso supone anular dos kilos de cemento en la mezcla. Sin embargo una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua (Jiménez et al. 1982).

Adición: Material que en una cantidad limitada, es molido simultáneamente o mezclado con el cemento hidráulico durante su fabricación. Tomado de la NC. 526:2007.

Aditivo: Material añadido en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento, antes o durante la mezcla del mortero, de manera que aporte a sus propiedades determinadas modificaciones bien definidas. Según la NC 175:2002.

Conglomerante: Material utilizado para unir un conjunto de partículas sólidas de manera que formen una masa coherente; por ejemplo cemento, cales para construcción, etc. Extraído de la NC 175:2002.

Polvo de piedra: Producto obtenido por trituración de rocas de diferentes naturalezas químicas y cuyos límites granulométricos se miden entre los tamices 4,76 y 0,074 mm. Tomado de la NC 54-264-1984.

Fino o filler: Material inerte finamente dividido, empleado para disminuir la retracción, actuar como extensores y mejorar la laborabilidad, la coherencia en morteros y hormigones. Extraído de la NC 251:2005.

Puzolanas: el código ASTM 618-78 (1992), define: “las puzolanas son materiales silíceos o alúmino-silíceos que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han molido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes”.

Tiempo de fraguado: El endurecimiento de la pasta de cemento (cemento + agua) se le llama fraguado. El tiempo en que comienza a mezclarse el cemento y el agua hasta que la pasta de cemento se fija se llama tiempo de fraguado (Erdogan, 1997).

El tiempo de fraguado de la pasta cementicia es afectada por varios factores, tales como: finura, relación agua/cemento, y la composición química. Existen dos importantes tiempos de fraguado definidos: fraguado inicial (tiempo que dura hasta que la pasta de cemento comienza a endurecerse considerablemente), y el tiempo de fraguado final (el tiempo en el que el cemento ha endurecido al punto que puede sostener una cierta carga). La pasta de cemento es solamente deformable durante el tiempo de fraguado. De esta forma, el tiempo de fraguado inicial debe ser suficientemente largo, y el tiempo que fraguado final debe ser bastante corto (Justo, 2012).

Probetas: Muestra tomada de una mezcla o material, la cual se introduce en un molde para que cumpla con determinados requisitos, antes de ser sometida a los ensayos previstos (Contrera, 2014).

Resistencia a la compresión: Propiedad que posee un material de no ser destruido bajo la acción de una carga. Esta propiedad se determina con un equipo nombrado Esclerómetro (Contrera, 2014).

1.2 Ejemplos de materiales residuales

Son diversos los residuos que se han ido incorporando a lo largo de la historia a los materiales de construcción de una forma segura y razonable como son los residuos o subproductos de otros procesos y materiales de origen natural. Ellos pueden o no, ser procesados antes de ser utilizados en los morteros y hormigones. Para su uso en el concreto, las adiciones al cemento, algunas veces son referidas como adiciones minerales que necesitan cumplir con los requerimientos de las normas establecidas. Ellos pueden ser utilizados individualmente o en combinación en el concreto (www.nrmca.org).

Cenizas volantes: Son subproductos de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre el 5 y 65 % en peso de los materiales cementantes. Las características de la ceniza pueden variar significativamente según la fuente del carbón que se quema, las cenizas volantes tipo F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen bajo contenido de calcio, las de tipo C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas (www.nrmca.org).

Humo de sílice: Es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silicio o ferro silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor 100 veces más pequeñas que un grano promedio del cemento. El humo está disponible como un polvo densificado o en forma de material acuoso, se utiliza entre 5 y 12 % en peso de los materiales cementantes para las estructuras de hormigón que necesitan alta resistencia o una permeabilidad significativamente reducida. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, el vaciado y curado del concreto (www.nrmca.org).

Escorias molidas de alto horno: Son subproductos no metálicos producidos en un alto horno, cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. Según la norma ASTM C 989 se definen tres grados de escorias, estas tienen por si misma propiedades

cementantes, pero son mejoradas cuando se utilizan con cemento Portland. Se utilizan entre 20 y 70 % en peso de los materiales cementantes (www.nrmca.org).

1.3 Caracterización de las escorias

Escoria metalúrgica: Escoria es el nombre aplicado al material fundido formado por las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del metal. La función metalúrgica de las escorias es la suma de su bajo punto de fusión, de su actividad química y de su baja densidad. La escoria tiene como misión principal atrapar las impurezas y separarlas del metal (Amaral, 1999).

Las escorias pueden ser resultantes de un amplio abanico de procesos como de la metalurgia del hierro, del acero, del níquel, del manganeso, del cromo, del cobre, etc. Los diversos tipos de escorias tienen funciones metalúrgicas semejantes, pero varían extensamente en sus propiedades físicas y químicas. Los procesos de fundición se pueden dividir según la materia prima utilizada en no ferrosas y ferrosas.

Escorias de fundición no ferrosa: Las materias primas son principalmente aluminio, cobre, bronce, latón, plomo, magnesio, zinc, níquel, etc. Este tipo de fundición tiene temperaturas de fusión baja (700 °C), de una potencia requerida (Amaral, 1999).

Escorias de fundición ferrosa: Las materias primas son principalmente hierro y acero. Las temperaturas de fusión son elevadas (1600 °C). Las escorias obtenidas en las fundiciones ferrosas son un subproducto 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.

Las escorias generadas en la producción de acero por el proceso de horno de arco eléctrico son, en su mayoría, de dos tipos: negras y blancas. Esta nomenclatura se debe al aspecto físico de la escoria.

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 (Amaral, 1999).

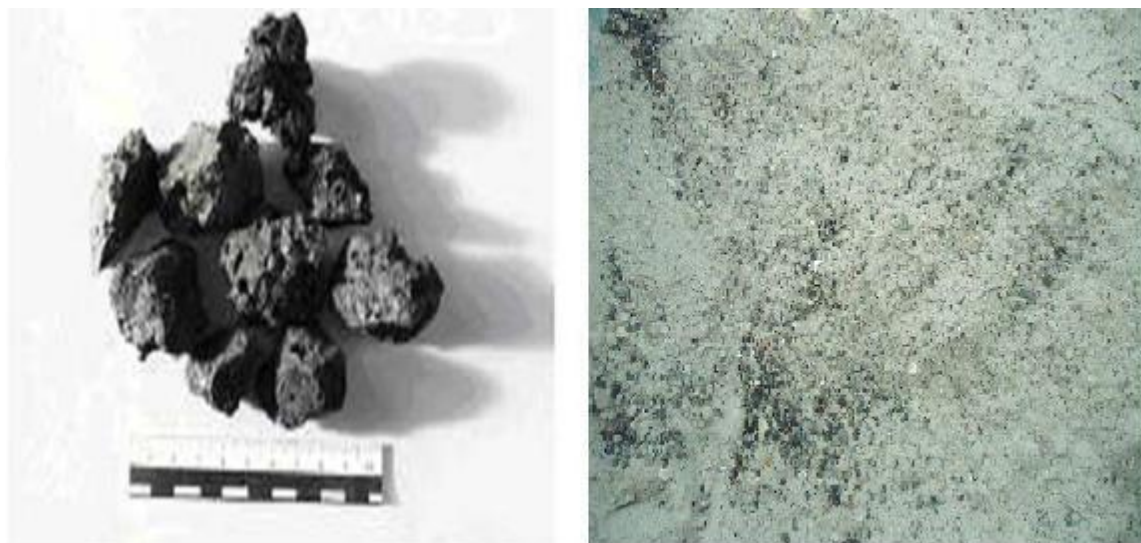


Figura 1. Aspecto de la escoria negra y de la escoria blanca con impurezas de otros materiales.

La fabricación del hierro se realiza en los hornos altos y las materias primas utilizadas son el mineral de hierro, el coque, la cal y la caliza o dolomía. Las escorias generadas son denominadas de horno alto, definidas por la [ASTM C125, 1998] como producto no metálico que consiste esencialmente en silicatos, aluminosilicatos de calcio y otras bases, que se desarrolló en condiciones líquidas juntamente con el hierro en el horno alto.

Para la fabricación del acero se utilizan principalmente tres tipos de procesos: horno básico a oxígeno, horno de arco eléctrico y horno Martín-Siemens. Las materias primas para la fabricación del acero son hierro y chatarras, en proporciones variables según el horno, cal y caliza o dolomía.

Los procesos de fabricación de acero pueden utilizar varias etapas de escorificación, siendo el proceso más común el de doble escoria (negra y blanca).

Las escorias se pueden clasificar según su procedencia como se muestra en el organigrama siguiente. Las escorias de horno alto suelen ser clasificadas también por la manera en que son enfriadas. Se utilizan tres tipos de enfriamiento: al aire,

expandidas y granuladas. Las escorias de acería en general, son enfriadas al aire (Amaral, 1999).

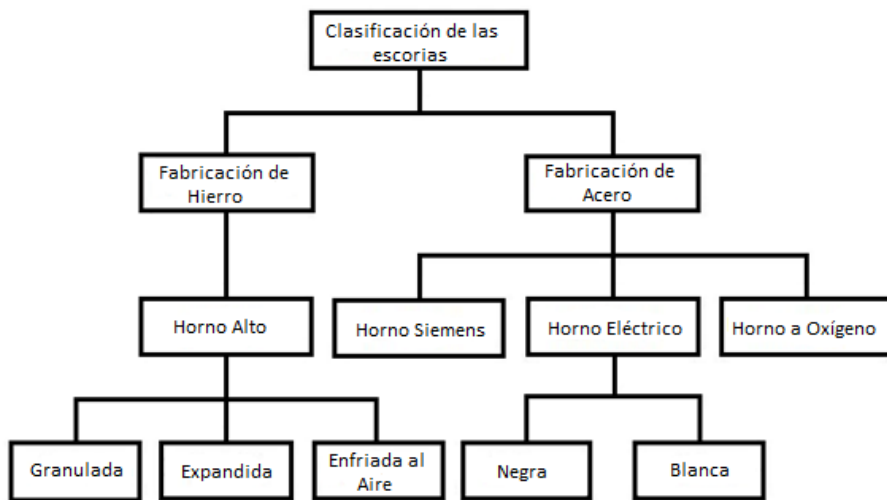


Figura 2. Clasificación simplificada según la procedencia de las escorias.

Escoria granulada: Obtenida por enfriamiento rápido que puede ser por agua, por aire comprimido o por agua y aire. La escoria obtenida es un material vítreo con propiedades hidráulicas latentes y granulometría semejante a una arena. Puede ser utilizada de dos maneras: como árido fino y como ligante hidráulico. Su uso más destacado es como ligante hidráulico, grandes cantidades de escoria granulada de alto horno vienen siendo utilizadas en la fabricación de cementos. (Amaral, 1999).

En Francia están normalizadas algunas de las características de la escoria granulada para su utilización como árido fino. La normativa [NF P18-306,1965] llama la atención sobre la incompatibilidad de las escorias con el cemento aluminoso en su estudio sobre la durabilidad de escoria granulada de alto horno como árido fino en mortero, concluye que el material es estable, tanto en los casos de hidratación acelerada como en aquellos en que se usan con cemento con alto contenido de álcalis. Existe además un aumento de la adherencia pasta-árido. Como árido no puede ser utilizada en bases y sub-bases de carreteras y en la fabricación de hormigones. Tiene la desventaja de poseer una proporción insuficiente de finos, formas angulosas, friabilidad y densidad variable (Amaral, 1999).

Escoria expandida: Obtenida por enfriamiento rápido, es expandida por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada aumenta la naturaleza vesicular produciendo un material ligero que es triturado y clasificado por fracciones. Tiene como principal característica una baja densidad y por ello se utiliza como árido en bloques de hormigón ligero y en estructuras de hormigón ligeras. Los bloques de hormigón con escorias expandidas poseen una alta calidad en cuanto a resistencia y durabilidad, siendo resistentes principalmente al fuego. La propiedad de aislamiento térmico es excepcionalmente buena en este tipo de bloques (Amaral, 1999).

Escoria enfriada al aire: Obtenida por enfriamiento a temperatura ambiente. Los óxidos componentes se cristalizan, pero no tiene lugar una cristalización total, resultando una mezcla de componentes cristalinos y vítreos. Los áridos de escoria son obtenidos por trituración, tienen densidades entre 2,0 y 2,5 g/cm³, resistencia al desgaste entre 20 y 35 %, presentan angulosidad elevada y estructura vesicular (Amaral, 1999).

Se utilizan en carreteras en EUA, Japón y Europa en general. Su angulosidad es adecuada para dar una buena estabilidad en capas de carreteras, aunque puede consumir más ligante. Por su estructura vesicular presentan buen comportamiento frente a las heladas. Normalmente se emplean en capas de rodaduras, bases y sub-bases (Amaral, 1999).

En la construcción civil el uso de la escoria enfriada al aire está muy consolidado como árido para hormigón. Algunos países tienen cubierto este tipo de utilización por normas, como por ejemplo, DIN 4226, [BS 1047, 1983] y [ASTMC 125, 1998]. En algunos países como Bélgica e Inglaterra existe un límite en cuanto a composición química, para evitar la presencia del silicato bicálcico. En los demás aspectos generales se utilizan las mismas normas que para áridos convencionales (Amaral, 1999).

1.4 Estado del arte

En España, **Luxán (1995)** realizó un importante trabajo utilizando escorias negras provenientes de dos factorías cercanas a Madrid.

En este se determinó la reactividad puzolánica de estas escorias, llegándose a la conclusión de que no poseían este tipo de reactividad. Mediante espectroscopía de absorción infrarroja se identificó la existencia de la reacción hidráulica. Con estos resultados se realizó un estudio sobre el comportamiento de la escoria como adición a morteros y hormigones, determinando el tiempo de fraguado, la estabilidad volumétrica, índice de actividad resistente, resistencia mecánica y la retracción en morteros.

Sobre la base de estos resultados se concluye que estas escorias no presentan ninguna reacción perjudicial en todos los análisis y ensayos efectuados, pudiendo utilizarlas como:

- Áridos en bases y sub-bases.
- Áridos en mezclas asfáltica.
- Adición en mezclas con cemento Portland para la fabricación de hormigón.

Bäverman et al. (1996) realizaron un estudio en el que la arena del hormigón fue sustituida por escoria de horno eléctrico. Las propiedades físicas investigadas fueron la resistencia a compresión y a flexotracción, así como la lixiviación del material. La escoria estudiada provenía de la empresa Fundia Steel AB (Suecia).

En cuanto a las propiedades físicas se observó que el hormigón con escoria tiene densidad más elevada y que la resistencia a compresión y flexotracción del hormigón con escoria es similar a la del hormigón de referencia. Concluyó que la escoria de acería de hornos eléctricos puede ser utilizada para sustituir arena en hormigón y que no existe riesgo ambiental asociado con su utilización.

En Brasil, **Geyer et al. (1997)** analizaron las posibilidades de utilización y los factores que limitan la utilización de la escoria como adición al cemento. Se realizaron los ensayos:

- Determinación de la resistencia a compresión.
- Ensayo de puzolanicidad.
- Determinación de la expansión.
- Ensayo de carbonatación, con determinación por fenolftaleína.

Para el ensayo de expansión por agujas de Le Chatelier se sustituyó 35 % de cemento por escoria y el resultado fue de expansión nula en el material. El índice de actividad puzolánica obtenido, utilizando escoria pasante por el tamiz 0,074 mm, fue de un 70 %. La autora concluye que la carbonatación en hormigón, con sustitución de un 5 % de cemento por escoria, disminuye en relación con el hormigón convencional. Deduce también que las adiciones del 70 % de escoria son inviables en cuanto a la carbonatación.

En su tesis doctoral, **Amaral (1999)**, realiza un trabajo investigativo sobre la utilización de la escoria de acero de horno eléctrico en los morteros y hormigones, exponiendo con amplitud el comportamiento de las distintas propiedades estudiadas como: la caracterización detallada en cuanto a composición química y mineralógica, características físicas y mecánicas y una evaluación de las sustancias nocivas para hormigones y morteros; efectuó un estudio de la presencia de la escoria en las mezclas y morteros, aplicando para ello ensayos de alta calidad como: la difracción de rayos X, microscopia electrónica, resonancia magnética nuclear y otras técnicas para evaluar estabilidad volumétrica, reactividad hidráulica de la escoria, resistencia mecánica, hidratación, efecto del agua de mar, carbonatación, así como los ensayos para determinar la caracterización de los hormigones según las normas. El estudio lo enmarca en las escorias producidas en países como: España, Brasil, Francia, China, Australia, EE. UU, Inglaterra, Alemania y Sudáfrica.

Frías (2006), en su trabajo “Características de la escoria de SiMn y su viabilidad como árido de reciclado en hormigones”, expone como estas escorias presentan características positivas con relación a las normas españolas consultadas por los autores, también los valores de resistencia a compresión que se obtienen (se ha obtenido una resistencia media de 38,2 MPa en probeta cilíndrica de 15 x 30 cm a 28 días de curado y 45 MPa para una edad de curado de 90 días) estos son resultados positivos, ya que se realizaron sustituyendo el 100 % del árido en la mezcla elaborada. No se evaluó el comportamiento cuando se sustituyen fracciones del árido.

En España, **Losáñez (2007)** en su tesis doctoral estudió la idoneidad de un aprovechamiento integral de las escorias de acería en construcción y en obra civil.

Plantea que la escoria blanca, tras un período de enfriamiento de entre 6 y 10 semanas a la intemperie en zonas húmedas, pierde casi totalmente su expansividad potencial convirtiéndose en un material pulverulento, y lo que es más importante, con un comportamiento estable.

El trabajo muestra que es positiva la inclusión de escoria blanca en los morteros de albañilería. Su uso en lugar de ciertos aditivos o componentes de los morteros puede suponer un ahorro económico y una optimización de recursos industriales. En la investigación se fabricó un suelo de cemento artificial, en el cual el “suelo” fue una mezcla de escoria negra y blanca, y el “cemento” una mezcla de cemento Portland y escoria blanca con muy buenas propiedades mecánicas.

Berridi (2008), realizó a un grupo de materiales residuales generados por las labores de fundición (arenas de fundición, escorias de alto horno y escorias de horno eléctrico) un estudio para evaluar el empleo de estos en función de sustituir determinadas proporciones de áridos en mezclas de hormigones. Al agregar estos materiales (arenas y escorias) todas las variantes estudiadas reflejan resultados positivos de resistencia a la compresión según la comparación que hicieron con los parámetros exigidos en las normas españolas UNE. Para ello, evalúan las escorias para la fabricación de cementos siderúrgicos, así como árido ligero, grueso y fino; conociendo que las escorias son enfriadas por diferentes métodos establece tres grupos: granulada, expandida y enfriada al aire; las escorias empleadas, establecen las dosificaciones para hormigones según las distintas escorias utilizadas; solo son evaluadas como sustitutas de arena en el hormigón y no son analizadas otras posibilidades de utilización, tampoco es ensayada para los morteros.

En Centroamérica, **Pérez (2008)** estudió la escoria producida en la planta Siderúrgica de Guatemala (SIDEGUA). Caracterizó tanto la escoria como el agregado tradicional y se evaluaron tres mezclas asfálticas con diferentes combinaciones de escoria-agregado tradicional (100 %, 0 %), (70 %, 30 %), (0 %, 100 %). La mezcla con 100 % agregado tradicional se utilizó como parámetro de comparación. De esta manera concluyó que:

- La estabilidad que presentaron las mezclas con escoria fue más alta que en las mezclas con agregado tradicional, contribuyendo a la durabilidad del pavimento, volviéndolo más resistente a la deformación causada por el tráfico.
- Al combinar la escoria con agregados tradicionales se consigue compensar el bajo porcentaje de finos en la misma y disminuir así el porcentaje de asfalto en la mezcla.

En Guatemala, **Alvares (2009)**, evaluó la escoria de ferroníquel como agregado fino para concreto. La escoria provenía de la planta de la Compañía Guatemalteca del Níquel (CGN) en el Estor, Izabal.

Mediante los análisis químicos de la escoria de mata de níquel se demostró la compatibilidad con el concreto, siendo este un material inocuo, y que no posee reacciones álcali-sílice dañina al cemento, el desgaste a sulfato de sodio se encontró dentro del rango permisible de aceptación, según el análisis del color de fenolftaleína aplicado a la edad mínima de 28 días, el concreto con escoria de mata de níquel no posee carbonatación, por lo cual, la alcalinidad es idónea ya que no reduce y mantiene el pH necesario para la protección del acero, cuando el concreto sea utilizado en un concreto estructural.

Soto et al. (2011); valoraron la escoria del horno de arco eléctrico de la Empresa Metalúrgica Antillana de Acero “José Martí”, en cuanto a sus propiedades químicas y granulométricas, pero no realizaron los ensayos correspondientes a la utilización de estas escorias en los morteros para determinar el comportamiento de las variables resistencia a la compresión y flexotracción como elementos esenciales a determinar, fueron analizadas variables no exigidas por las normas cubanas aportando poca información con relación a los resultados que se requieren de un trabajo a este nivel.

Alejandro (2005), expone las dosificaciones elaboradas con escorias negra en porcentajes de adición que varían entre 0 y 60 % y la resistencia a la compresión oscila entre 23 y 40 MPa sin presentar una importancia marcada el porcentaje que se adiciona, otros parámetros como: la absorción cumplen con el requisito de la norma para cuando se añade 60, 40 y 20 % de escoria (en ese orden la absorción se eleva,

lo que resulta negativo al alcanzar valores mayores de 5 %); igual sucede con la porosidad. Ilustra además algunas instalaciones para elaborar estos materiales y proyectos constructivos (casas urbanas, edificios de 8 pisos, plazas públicas, pavimentos, etc.) realizados completamente con estos materiales ecológicos (ladrillos, bloques, hormigón, mortero). Similar al estudio realizado por Alejandro (2005) se realiza en el siguiente trabajo pero con escoria blanca de ACINOX-Las Tunas. La diferencia consiste en que él utilizó escoria negra en porcentajes de adición de 0 % a 60 % y en el trabajo se utilizara escoria blanca en porcentajes de sustitución del 10 al 50 % para morteros y el 15 % para los hormigones.

1.5 Experiencias locales sobre el uso de las escorias como material de la construcción

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. 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, basados en investigaciones e ensayos internos de la fábrica, fueron utilizadas una parte de las escorias generadas por la planta en:

- La realización de 5000 bloques de hormigón en coordinación con el CAI Majibacoa y con la Empresa de Materiales de la Construcción.
- Construcción de más de 3000 m² de aceras en el reparto médico del municipio.
- La realización de las Parrilladas del Cornito.
- La construcción de pisos internos y muros delimitadores en el interior de la acería.
- Cimentación de cerca en varias instalaciones de la empresa.

1.6 Conclusiones parciales

Revisando la conceptualización antes mencionada se observó lo siguiente:

- En estudios internacionales se corrobora que la escoria de horno de arco eléctrico no muestra reactividad puzolánica.
- Las principales investigaciones están orientadas al empleo de las escorias negras de acería como árido en la confección de hormigones.
- Hasta el momento no se conoce investigación alguna, en la que se evalúe la escoria blanca generada en ACINOX-Las Tunas para ser utilizada como sustitución de cemento en la preparación de mezclas de morteros y hormigón, como una alternativa de utilización en la industria de materiales de construcción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo y el éxito de toda investigación están basados en la fiabilidad de los resultados, herramienta fundamental para su validación. La adecuada selección de los materiales y métodos merece una especial atención. De ahí que el objetivo de este capítulo sea describir los principales materiales a utilizar, los métodos y técnicas empleados para la realización del trabajo.

2.1 Diseño de la investigación

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 flexión y a la compresión.

2.2 Diseño de experimento

Por la sencillez y rapidez de 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 y se mantienen constante todos los demás. De este modo, la variación de las respuestas se puede atribuir entonces a un solo factor.

Sujeto a lo anteriormente dicho, para el presente estudio se analizará solamente la influencia de la presencia de escoria en la resistencia mecánica de los morteros con sustitución parcial del 10 al 50 % de cemento Portland P-350 por escoria blanca.

En el caso de hormigón, se decidió analizar la sustitución del 15 % de cemento Portland P-350 por escoria blanca para diferentes niveles de resistencia (10, 15, 20, 25 y 30 MPa) a la compresión.

2.3 Toma y preparación de la muestra

El muestreo de la escoria se realizó por puntos para garantizar un muestreo sin desviaciones. La muestra se compuso de tres partes, una tomada en la parte superior, otra en la parte media y la tercera en la parte inferior de la pila de escoria. Para facilitar el muestreo se empleó una tabla empujada 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. Este proceso se efectuó en tres días consecutivos extrayendo aproximadamente 10 kg de escoria por día, sometiendo a cada una de las muestras a homogenización y cuarteo por el método de cono y anillo (figura 3) a partir de lo cual obtuvimos dos porciones iguales de muestras empleando una de ellas para el análisis granulométrico y otra para el análisis químico.

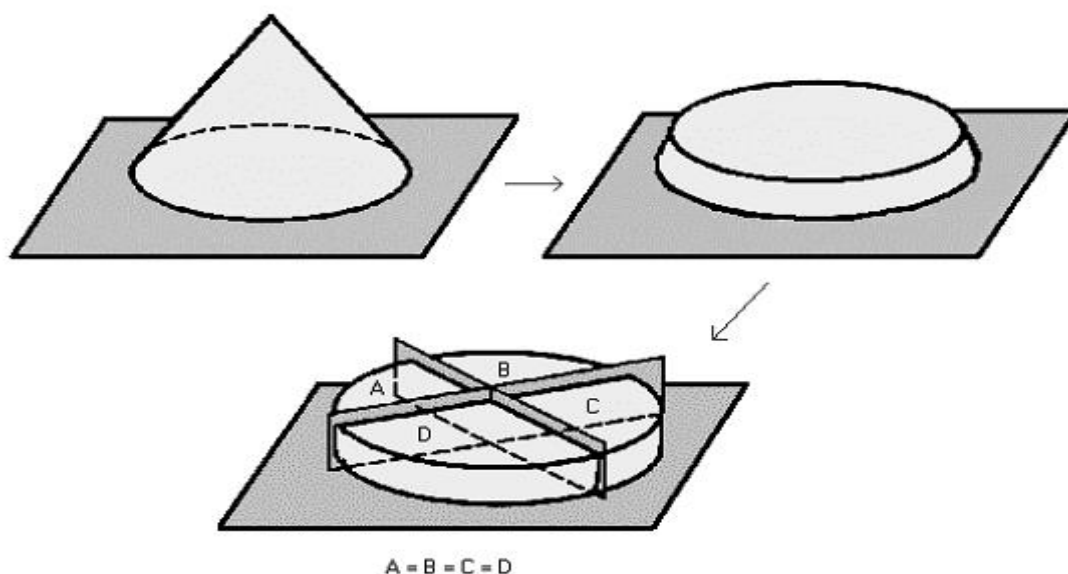


Figura 3. Método de cono y anillo.

Para la realización del análisis granulométrico y químico se prepararon tres muestras, estas fueron obtenidas por cuarteo sucesivo. En la figura 4 se muestra el esquema empleado.

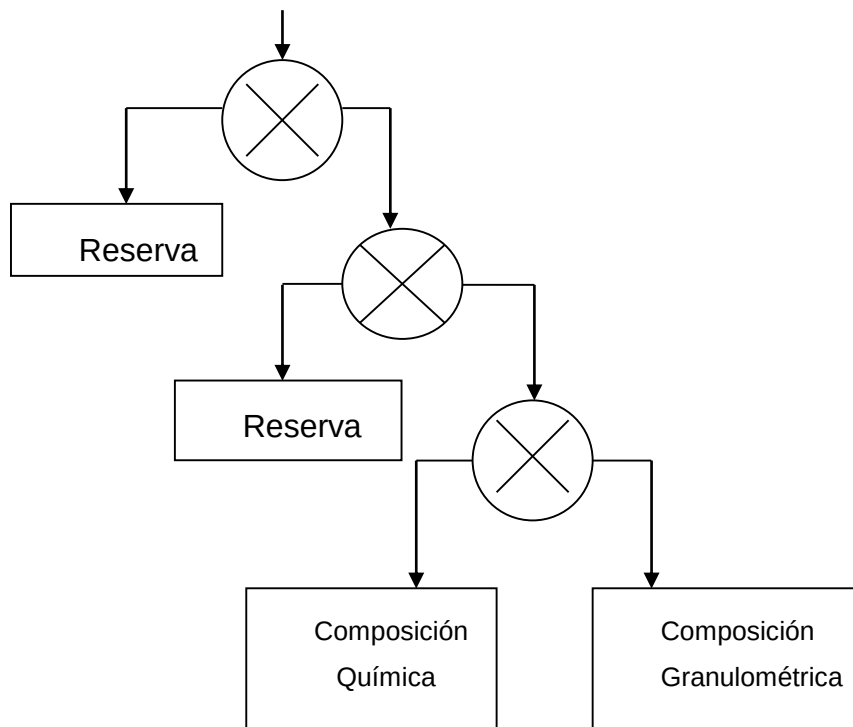


Figura 4. Esquema de cuarteo empleado para la preparación de las muestras estudiadas.

Ya obtenida una muestra homogénea y representativa se procedió a desarrollar un análisis granulométrico. Para ello el material se sometió a un proceso de secado en una estufa eléctrica (figura 5) a una temperatura de 105 °C por 24 horas para eliminar su humedad. Posteriormente, se sometió a un proceso de tamizado con la ayuda de un juego de tamices. Para la elaboración de los morteros y hormigones se utilizó la escoria retenida en el tamiz 0,04 mm.



Figura 5. Estufa eléctrica.



Figura 6. Tamizadora y juego de tamices.

2.4 Determinación de la composición química

El método empleado para la obtención de la composición química de las escorias blancas de ACINOX-Las Tunas fue Fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de marca Philips PW 2404, el cual se muestra en la figura 7.

El principio de funcionamiento del equipo (FRX) consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento, y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad. Mediante la resolución de un sistema de ecuaciones el equipo calcula los contenidos de los diferentes elementos, a través de la correspondencia con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo.



Figura 7. Equipo de fluorescencia de rayos X, Philips.

2.5 Determinación de la composición granulométrica

La granulometría es la distribución de los tamaños de un material, expresado como porcentaje en masa que pasa por los tamices. El tamaño del material es expresado como una franja entre el tamiz más pequeño (d) y el mayor (D), expresados ambos en mm.

La granulometría es muy útil para la fabricación de hormigón y morteros porque determina la laborabilidad y la cohesión de estos en estado fresco, siendo su conocimiento fundamental para la dosificación. 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 enmarcándose la clases de tamaño (+0,40; -0,40 +0,20; -0,20 +0,08; -0,08 +0,04 y -0,04 +0,00 mm).

2.6 Preparación de mezclas y confección de probetas

Los materiales empleados para la confección de las mezclas para morteros y hormigones son los siguientes: escoria blanca de ACINOX-Las Tunas, arena de la cantera El Rincón, polvo de piedra y grava 19-10 mm de la cantera José Rodríguez, cemento Portland P-350 y agua.

2.6.1 Preparación de las mezclas y confección de las probetas de mortero

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se efectuó la elaboración del mortero de albañilería de acuerdo a la NC 175:2002. Esta norma define 5 tipos de mortero de albañilería del cual se escogió el de tipo III, en este caso la dosificación volumétrica es 1:4:2. Este tipo de mortero se utiliza para unir elementos (bloques, ladrillos, etc.) y los de revestimiento para enchape de cerámica y revoque de techos, paredes, etc.

En el trabajo se elaboraron en total 54 probetas para mortero, 9 (pp) probetas patrones, 9 (ps10 %) probeta con sustitución del 10 % de cemento por escoria blanca, 9 (ps20 %) con el 20 % de sustitución del cemento por dichos materiales e igual número de probetas para la sustitución de escoria por cemento a un 30, 40 y 50 %, respectivamente. Para la elaboración de los morteros el mezclado se realizó manualmente.

Primeramente se realizaron los patrones de referencia, vertiendo las cantidades de materiales sólidos establecidas en el recipiente, luego se vertió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas que aparecen en la tabla 1. La mezcla de los mismos se realizó durante 30 s a una velocidad lenta hasta lograr una buena homogenización. Después se dejó en reposo durante 30 s y se mezcló nuevamente a una velocidad un poco más rápida por 60 s, lo que permitió una buena homogenización de los materiales.

La mezcla confeccionada se vertió en tres capas en los moldes (figura 8), la primera y la segunda capa permite que se expulse el aire atrapado en el material y la humedad suba a la superficie, y la tercera capa permite emparejar y enrasar los moldes, todas las operaciones para la confección de los moldes se realizó a través de la NC 173:2002.

Luego, según el procedimiento de la norma NC 73:2002, se preparan los morteros, donde se emplearon moldes (figura 8) de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada ensayo, lo que genera tres probetas para el ensayo de flexión y seis para el ensayo a compresión. Luego de su realización estos moldes fueron situados en un local donde se garantizó buena conservación, y pasadas 24 horas se extrajeron y se colocaron en

el área de curado hasta las edades correspondientes para los ensayos de resistencia a la flexión y compresión aplicados a los 7, 14 y 28 días. De forma similar al procedimiento para la elaboración de los morteros patrones, se realizaron las restantes probetas con las dosificaciones expuestas en la tabla 1. La relación agua/cemento-escoria-arena-polvo de piedra quedó determinada, por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal para cada material, debido a que en la práctica el agua se añade en la mezcla hasta obtener la plasticidad y consistencia de la masa requerida, y puede variar para cada tipo de material según sus características, fundamentalmente la capacidad de absorción como consecuencia de las condiciones de almacenamiento, situación climatológica y prestación de la mezcla.

Tabla 1. Dosificaciones y por ciento de sustitución de materiales en la mezcla para la confección de los morteros.

Material	Sustitución de escoria blanca por cemento P-350, %	Dosificaciones					Relación
		Cemento (g) (I)	Polvo de piedra (g) (II)	Escoria (g) (III)	Arena (g) (IV)	Agua (ml) (V)	I:IV:II
PP	0	220	692	0	1124	350	1:4:2
PS	10	198	692	22	1124	350	1:4:2
	20	176	692	44	1124	350	1:4:2
	30	154	692	66	1124	350	1:4:2
	40	132	692	88	1124	350	1:4:2
	50	110	692	110	1124	350	1:4:2



Figura 8. Moldes para la confección de las probetas de mortero.

2.6.2 Preparación de las mezclas y confección de las probetas de hormigón

Dando cumplimiento a los objetivos planteados en el trabajo se efectuó la elaboración de las probetas cilíndricas de hormigón según la NC 221:2002.

En el trabajo se elaboraron en total 30 probetas cilíndricas para hormigón, todas con sustitución del 15 % de cemento por escoria, 6 (rc10) probetas para la obtención de 10 MPa de resistencia a la compresión, 6 (rc15) probetas para la obtención de 15 MPa e igual número de probetas para la obtención de 20, 25, y 30 MPa, respectivamente. En este caso no se elaboraron probetas patrones o de referencia porque se cuenta con los resultados de los ensayos de compresión realizados a mezclas de hormigón para 10, 15, 20, 25 y 30 MPa. Conociendo las dosificaciones de las mezclas que alcanzaron las resistencias anteriormente mencionadas a los 28 días se le sustituyó el 15 % de cemento P-350 por escoria blanca. Para la elaboración del hormigón el mezclado se realizó mediante una mezcladora eléctrica (figura 10).

Primeramente se realizaron las probetas (rc10) para obtener 10 MPa de resistencia a la compresión, para ello se vertió la cantidad de árido grueso, arena, cemento y escoria prefijada en la mezcladora (figura 10), luego se vertió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas que aparecen en la tabla 3.

Ya preparada la mezcla los moldes se colocaron a la sombra, en una superficie plana y horizontal, firme y exenta de vibraciones u otros movimientos; posteriormente se engrasaron en su interior para facilitar el desmoldeo pasado 24 h. La mezcla confeccionada se vertió en tres capas en los moldes, la primera y la segunda capa permite que se expulse el aire atrapado en el material y la humedad suba a la superficie, y la tercera capa permite emparejar y enrasar los moldes, todas las operaciones para la confección de los moldes se realizó a través de la NC 221:2002.

Luego, según el procedimiento de la norma NC 221:2002, se preparan las probetas de hormigón, donde se emplearon moldes cilíndricos (figura 9) de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto. Luego de su realización estos moldes fueron situados en un local donde se garantizó buena conservación, y pasadas 24 horas se extrajeron y se colocaron en el área de curado, tipo inmersión hasta las edades correspondientes para los ensayos de resistencia a la compresión aplicados a los 7 y 28 días. De forma similar al procedimiento para la elaboración de las probetas de hormigón para 10 MPa de resistencia a la compresión, se realizaron las restantes probetas con las dosificaciones ya mencionadas. La relación agua/cemento-escoria-arena-arena 19-10 mm quedó determinada, por la necesidad de alcanzar la fluidez requerida según los ensayos de consistencia normal para cada material, debido a que en la práctica el agua se añade en la mezcla hasta obtener la plasticidad y consistencia de la masa requerida, y puede variar para cada tipo de material según sus características, fundamentalmente la capacidad de absorción como consecuencia de las condiciones de almacenamiento, situación climatológica y prestación de la mezcla.

A continuación se muestra en la tabla 2 las dosificaciones patrones y en la tabla 3 las dosificaciones con sustitución de un 15 % de escoria blanca por cemento Portland P-350.

Tabla 2. Dosificaciones patrones para la realización de hormigón.

Elementos	Unidades	Dosificaciones patrones				
Resistencia a la compresión esperada a los 28 días	MPa	10	15	20	25	30
Cemento P-350	kg	70	92	112	128	143
Arena	kg	214	203	214	186	179
Fracción 19-10 mm	kg	261	249	237	228	219
Agua	l	67	68	70	72	73
Relación A/C	-	0,96	0,74	0,63	0,56	0,51
Asentamiento	cm	8 a 9	8 a 9	8 a 9	8 a 9	8 a 9

Tabla 3. Dosificaciones y por cientos de sustitución en la mezcla para la confección de los hormigones con sustitución del 15 % de escoria blanca por cemento P-350.

Elementos	Unidades	Dosificaciones con escoria blanca				
Resistencia a la compresión esperada	MPa	10	15	20	25	30
Cemento P-350	kg	59	78	95	109	122
Arena	kg	214	203	194	186	179
Fracción 19-10 mm	kg	261	249	237	228	219
Agua	l	68	70	72	74	75
Relación A/C	-	1,14	0,9	0,76	0,68	0,62
Escoria blanca	kg	11	14	17	19	21
Asentamiento	cm	8 a 9	8 a 9	8 a 9	8 a 9	8 a 9



Figura 9. Moldes para la confección de las probetas cilíndricas de hormigón.



Figura 10. Mezcladora eléctrica.

2.7 Determinación de las resistencias mecánicas

Luego de preparadas las probetas de morteros y hormigón y llegadas las edades de ensayo se le determinó la resistencia a la flexión y a la compresión. El procedimiento seguido se describe a continuación.

La determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión de los morteros realizados se llevó a cabo a través de una prensa hidráulica de 10 t (figura 11), la cual arroja los valores en kilonewton (kN), no obstante los resultados finales se dan en megapascal (MPa). El equipo cuenta con los aditamentos (figura 12 y 13) necesarios para dichos ensayos, uno para realizar la compresión y otro para la flexión cada aditamento se coloca por separado en el equipo para realizar los ensayos.

Por otra parte, a las edades de 7 y 28 días se le realizaron los ensayos de resistencia a la compresión a las probetas cilíndricas de hormigón con la ayuda de una prensa hidráulica de 125 t (figura 14), la cual arroja los valores en kilonewton (kN), no obstante los resultados finales se dan en megapascal (MPa). El equipo cuenta con el aditamento (figura 15) necesario para dicho ensayo.

2.7.1 Determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión en morteros

Ensayo de resistencia a la flexión

El ensayo de resistencia a la flexión, se realizó con ayuda de un aditamento especial (figura 13), el cual contiene tres cilindros de acero de 10 mm de diámetro; dos de ellos,

sobre los cuales se apoya el mortero, situados en un mismo plano y paralelos a la distancia de 100 mm, el tercero equidista de los dos primeros y se apoya sobre la cara opuesta de la probeta. Uno de los cilindros de soporte y el cilindro de carga serán capaces de oscilar ligeramente con relación a sus centros para mantener una distribución uniforme de la carga a todo lo ancho del mortero sin someterlo a esfuerzos de torsión.

El mortero se colocó sobre los cilindros de soportes, de forma que su eje longitudinal sea perpendicular a los ejes de estos y su eje transversal y el del cilindro de carga se encuentren en el mismo plano y paralelos entre sí.

Ensayo de resistencia a la compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión cada probeta se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma. Para ello se utilizaron dos placas de acero de dureza no inferior a HRC 60, de $1,040 \pm$ mm de ancho y largo, y de espesor mínimo de 10 mm, las cuales son planas con un error menor de 0,02 mm. El conjunto se colocó entre los platos de 21 x 21 cm de la prensa que aparece en la (figura 11), cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal.

Uno de los platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con la probeta. Estas condiciones se obtuvieron con un aditamento especial para el ensayo de compresión colocado entre los platos de la prensa, ya que estos son mayores que el tamaño establecido, por lo que es recomendable usar el mismo aditamento que permita transmitir la carga de la máquina sobre las superficies de las probetas sometidas al esfuerzo de compresión. En el aditamento la placa inferior fue introducida en la platina inferior.

La placa superior con rótula recibe la carga transmitida por el plato superior de la prensa a través del conjunto de deslizamiento, el cual debe ser capaz de oscilar verticalmente sin apreciable fricción en el aditamento que guía.



Figura 11. Prensa hidráulica de 10 t.



Figura 12. Aditamento para la compresión.



Figura 13. Aditamento para la flexión.

2.7.2 Determinación de la resistencia a la compresión en hormigón

En el ensayo de resistencia a la compresión cada probeta se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma. Para ello se utilizaron dos platos de acero de dureza no inferior a HRC 55 y con tratamiento tal que la profundidad de la capa tratada sea menos de 5 mm. La superficie de los platos deberá poseer un error de planeidad inferior de 0,01 mm cada 100 mm. El conjunto se colocó entre los platos de 50 x 50 cm en la prensa que aparece en la (figura 14), cuya rótula está centrada sobre el eje de las secciones sometidas a compresión. Los platos se guiaron sin fricción apreciable durante el ensayo para poder mantener siempre la misma proyección horizontal.

Uno de los platos se mantuvo ligeramente inclinado con el objetivo de obtener un perfecto contacto con la probeta. Estas condiciones se obtuvieron con un aditamento especial para el ensayo de compresión colocado entre los platos de la prensa, ya que estos son mayores que el tamaño establecido, por lo que es recomendable usar el mismo aditamento que permita transmitir la carga de la máquina sobre las superficies de las probetas sometidas al esfuerzo de compresión. En el aditamento la placa inferior fue introducida en la platina inferior.

La placa superior con rótula recibe la carga transmitida por el plato superior de la prensa a través del conjunto de deslizamiento, el cual debe ser capaz de oscilar verticalmente sin apreciable fricción en el aditamento que guía.

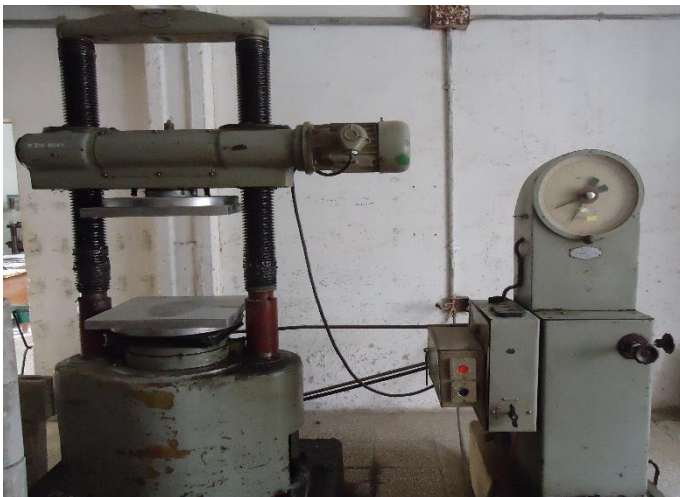


Figura 14. Prensa hidráulica de 125 t.



Figura 15. Anillos de aceros para la realización de la compresión.

2.8 Conclusiones parciales

- Se determinaron las características químicas y granulométricas del residuo en estudio.
- Las muestras de escoria blanca seleccionada para ser caracterizada se considera representativa.
- Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicados en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos según las normas cubanas e internacionales.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se presentan los resultados experimentales que confirman la hipótesis sobre las potencialidades de la escoria blanca como alternativa de utilización en la industria de materiales de construcción, a través de sus características químicas, granulométricas y las propiedades físico-mecánicas de mezclas conformadas con este material. En todos los ensayos realizados los resultados que se obtienen son comparados con los valores que se exigen en las normas cubanas correspondientes.

3.1 Resultados experimentales y su análisis

3.1.1 Composición química

Es importante destacar que la composición química de la escoria depende, entre otros factores, del tipo de acero que se esté fabricando. 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 %) y el reducido tamaño de sus partículas provienen del fenómeno de pulverización durante el enfriamiento de la escoria. En cuanto a la composición química, son ricas en calcio y silicio y tienen bajo contenido en hierro.

Ensayos químicos realizados en España establecen la siguiente composición para las escorias blancas de acería:

Tabla 4. Composición química de la escoria blanca (España). Fuente: www.cedexmateriales.vsf.es.

Óxidos	%	Fluoruro (%)	1,4
SiO ₂	17,4-19,3	Sulfuro (mg/kg)	503
FeO ₃	1,1-3,6	Zinc (ppm)	596
FeO	0,0-0,95	Plomo (ppm)	84
Al ₂ O ₃	3,2-10,4	Cobre (ppm)	200
CaO	45,3-62,1	Cromo (ppm)	150
MgO	4,5-17,2	Níquel (ppm)	80
MnO	0,0-1,2		

A continuación se da a conocer la composición química de la escoria blanca de la planta siderúrgica de la provincia de Las Tunas.

Tabla 5. Composición química de la escoria blanca de ACINOX-Tunas.

Óxidos	SiO ₂	FeO ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅
%	24,04	0,80	6,50	57,00	8,06	0,30	0,061	0,024

Realizando un análisis de los resultados que se muestran en las tablas 4 y 5, se observa que las escorias obtenidas en ambos ensayos poseen características químicas similares, donde los principales óxidos que constituyen la escoria blanca son CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃ y en menor concentración FeO₃ y MnO.

3.1.2 Composición granulométrica

Como se puede apreciar en la tabla 6 el material resultó poseer mucho material fino, siendo esto favorable porque se puede usar como adición al cemento. En los tamices

0,40 mm y 0,20 mm se retuvieron algunas impurezas y materiales que forman parte del proceso de formación de la escoria blanca.

Tabla 6. Composición granulométrica de la escoria blanca de ACINOX-Las Tunas.

Clases (mm)	SALIDA			
	(g)	(%)	Sumaria por más, (%)	Sumaria por menos, (%)
+0,4	247,56	24,76	24,76	100,00
-0,4 +0,2	113,14	11,31	36,07	75,24
-0,2 +0,08	229,68	22,97	59,04	63,93
-0,08 +0,04	319,11	31,91	90,95	40,96
-0,04 +0,00	90,51	9,05	100,00	9,05
Total	1000,00	100,00		



Figura 16. Fracciones retenidas en los tamices 0,40; 0,20 y 0,04 mm, respectivamente.

3.1.3 Resistencias mecánicas

En este acápite se ofrecen los resultados de los ensayos mecánicos a la flexión y compresión por muestras preparadas con escoria blanca y muestras patrones de cemento, a las edades correspondientes, y compararlos para estimar las posibilidades de su uso en la construcción.

Los resultados de las pruebas de las resistencias mecánicas son de gran importancia para las posibles aplicaciones y control de la calidad de los cementos, morteros y

hormigones, principalmente la resistencia a la compresión, la cual puede ser utilizada como criterio principal para seleccionar el tipo de mortero y hormigón, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades, como la adherencia y absorción. En el trabajo se emplea precisamente, para verificar cómo se comportan las resistencias en el tiempo al comparar las probetas con escoria, con los patrones de referencia.

3.1.3.1 Resultados obtenidos en los ensayos a los morteros

Resistencia a la flexión

Tabla 7. Resultados de los ensayos de resistencia a la flexión en los morteros a los 7, 14 y 28 días.

Material	Sustitución de escoria blanca por cemento P-350, %	Resistencia a la flexión, MPa		
		7 días	14 días	28 días
Probeta Patrón	0	0,96	0,97	1,72
Probetas con sustitución	10	0,95	0,96	1,69
	20	0,81	0,82	1,63
	30	0,62	0,63	1,45
	40	0,51	0,52	1,33
	50	0,42	0,43	1,22

En la figura 17 se representa el comportamiento de la resistencia a la flexión en el tiempo transcurrido entre los 7 y 28 días. Se observa que los morteros (ps10 %) con sustitución del 10 % de escoria muestran valores de resistencia a la flexión cercanos a los patrones a edades de ensayo, lo que permite poder realizar combinaciones de mezclas con la adición de menor cantidad de cemento, permitiendo un ahorro de este material. En el caso de las restantes dosificaciones se aprecia, que ha mediada que aumenta el contenido de escoria en la mezcla disminuye la resistencia a la flexión.

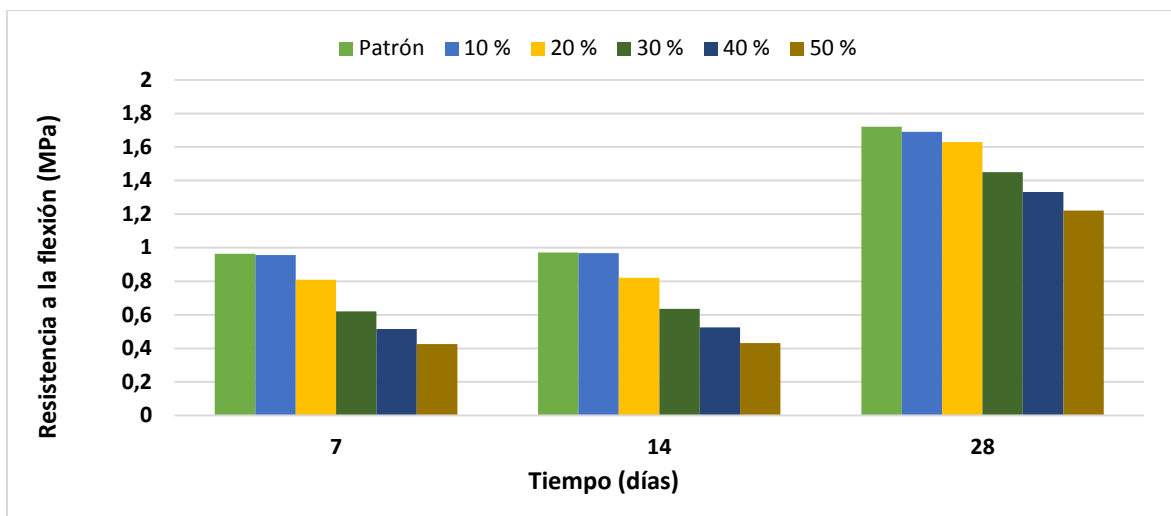


Figura 17. Resistencia a la flexión de los morteros de referencia y los morteros con 10, 20, 30, 40 y 50 % de escoria blanca.

Resistencia a la compresión

La determinación de la resistencia a la compresión permitió observar la contribución de la adición del 10 % de escoria blanca a la mezcla, en el cual se observa que a los 7, 14 y 28 días fue prácticamente similar a los morteros de referencia.

Tabla 8. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los morteros a los 7, 14 y 28 días.

Material	Sustitución de escoria blanca por cemento P-350, %	Resistencia a la compresión, MPa		
		7 días	14 días	28 días
Probeta Patrón	0	3,6	4,2	5,2
Probetas con sustitución	10	3,4	4,1	5,2
	20	2,9	3,5	4,2
	30	1,7	2,4	3,3
	40	1,2	1,8	2,4
	50	0,8	1,4	1,9

Se aprecia en la figura 18 que las restantes dosificaciones no superan los patrones, siendo esto un resultado no del todo insatisfactorio. Esto se debe a que la NC 175:2002

define 5 tipos de morteros según la aplicación y la resistencia a la compresión a los 28 días.

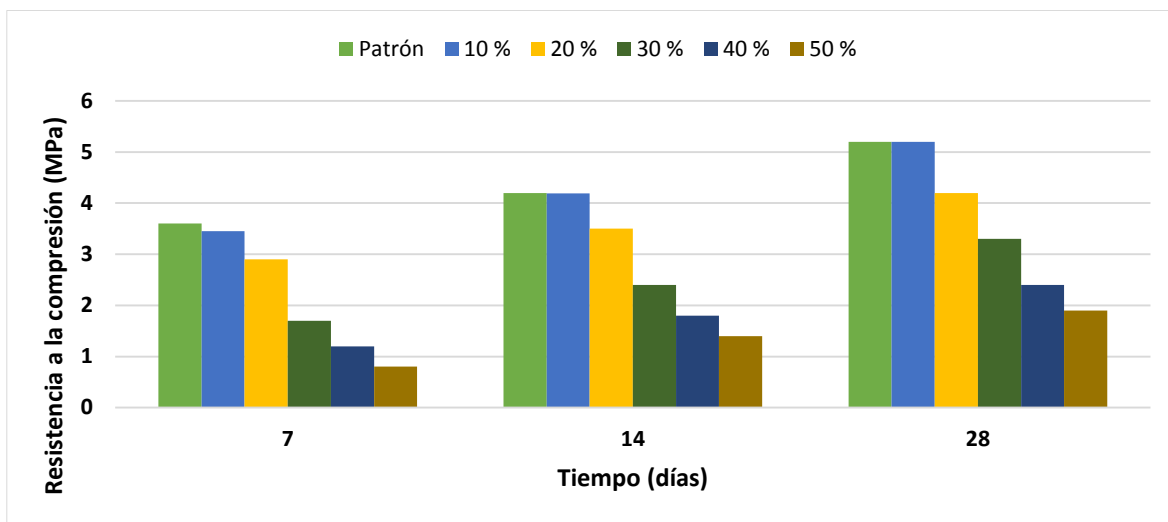


Figura 18. Resistencia a la compresión de los morteros de referencia y los morteros con 10, 20, 30, 40 y 50 % de escoria blanca.

Tabla 9. Propiedades de los morteros de albañilería. Fuente: NC 175: 2002.

Tipos de morteros	Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa
I	2,4
II	3,5
III	5,2

Según esta norma, el mortero de tipo 1 debe poseer una resistencia a los 28 días de 2,4 MPa. Como se aprecia en la tabla 8 el mortero con sustitución del 20, 30 y 40 % de escoria presenta una resistencia mayor, lo cual hace posible el uso de estas dosificaciones para la fabricación de este tipo de mortero, constituyendo un gran ahorro de cemento. Para la confección de morteros de tipo II pudiera emplearse hasta un 20 % de escoria. Estos tipos de morteros se utilizan para la construcción de muros no portantes sobre y bajo el nivel del terreno.

3.1.3.2 Resultados obtenidos en los ensayos al hormigón

En la tabla 10 se observa los resultados a la compresión en los hormigones elaborados con 15 % de escoria.

Tabla 10. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión en los hormigones.

Patrones 28 días (MPa)	7 días (MPa)	28 días (MPa)
10	9,7	12,8
15	12,8	17,3
20	16,2	22,2
25	19,7	27
30	23,1	32,1

Se puede apreciar en la figura 19 como el aumento de las resistencias mecánicas a la compresión es directamente proporcional al incremento de la magnitud tiempo. Se verifica como la adición de escoria hasta un 15 % en la fabricación de hormigones no es perjudicial y que todas las dosificaciones elaboradas cumplen con las expectativas planteadas en el trabajo. La resistencia a la compresión es más elevada en la mezcla con escoria, con valores de hasta 2 MPa superiores a los de la mezcla sin el mismo.

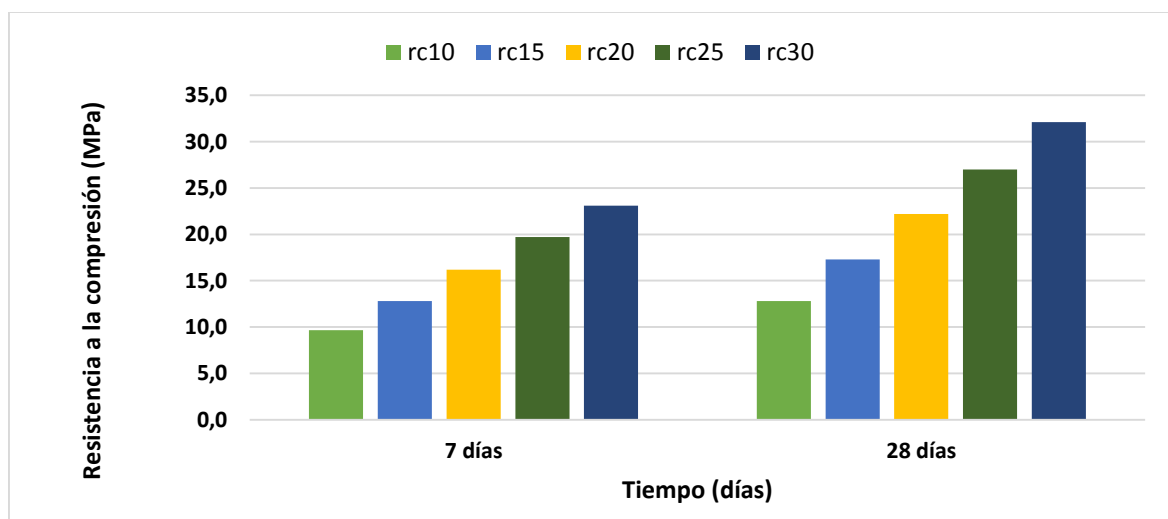


Figura 19. Resistencia a la compresión de los hormigones con 15 % de escoria para 10, 15, 20, 25 y 30 MPa.

3.2 Conclusiones parciales

- La composición química de la escoria blanca de ACINOX-Tunas está constituida principalmente por óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO_2), óxido de manganeso (MgO) y óxido de aluminio (Al_2O_3) en concentraciones de 57,0; 24,04; 8,06 y 6,50; respectivamente.
- Con los resultados del análisis granulométrica se comprobó que el 31,91 % de la muestra se encuentra en la fracción $-0,08 +0,04$.
- Se comprobó mediante las propiedades físico-mecánicas de los morteros y hormigones con la adición de escoria blanca que la resistencia máxima a la compresión para los hormigones de 32,1 MPa y para los morteros de 5,2 MPa.

CONCLUSIONES

Se comprobó que el empleo de las escorias blancas de acería pueden ser utilizadas como una alternativa en la industria de materiales de la construcción. Mediante los ensayos mecánicos se demostró que es factible, sustituir el 15 % escoria blanca por cemento P-350 y alcanzar valores de resistencia a la compresión de 12,8; 17,3; 22,2; 27 y 32,1 MPa, mientras que los patrones alcanzaban hasta 10; 15; 20; 25 y 30 MPa, respectivamente. En el caso de los morteros se obtuvo que pueden ser obtenidos varios tipos de mortero siempre que no se sobrepase del 40 % de escoria. Los resultados más alentadores en los morteros se obtuvieron sustituyendo un 10 % de escoria por cemento, obteniendo valores de resistencia a la compresión de 5,2 MPa, similar al del mortero patrón. La importancia de esto recae en que por cada 220 g de cemento P-350 se pueden ahorrar 22 g de cemento.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos y su valoración se recomienda:

- Analizar la influencia de la escoria blanca en el hormigón armado.
- Evaluación de la durabilidad y sostenibilidad de las propiedades que se ensayan para cortos períodos de tiempo con resultados positivos y no son ensayados en el transcurso de los años para conocer la vida útil de las mezclas diseñadas.

BIBLIOGRAFÍA

ALEJANDRO, S. J. 2005. Experiencia de reciclaje en la producción de materiales de construcción. Quinto Congreso Nacional disposición final de residuos sólidos. ECO-Ingeniería, E.U. alsaja@uniweb.net.co.

ALVAREZ, M. L.M. 2009. Evaluación de la escoria de ferromnquel como agregado fino para concreto. Dilma Yanet Mejicanos Jol (Tutor). Trabajo de Diploma. Universidad de San Carlos de Guatemala.

AMARAL, L. L. 1999. Hormigones con escoria de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Barcelona.

ANDREIVE, S., PEROV, V. y ZVERIEVICH, V. 1980. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales, Editorial Mir, Moscú.

BÄVERMAN, C. y ARAN, F. A. 1996. A study of the potential of utilizing electric arc furnace slag as filling material in concrete. Draft.

BERRIDI, A. I. 2008. Análisis de la influencia de residuales Metalúrgicos como áridos en las propiedades del Hormigón. Barcelona, España.

BOGACHKOV, A. N. 2001. Estudio para la utilización de la escoria del horno cuchara en la elaboración de cementos. Tesis de Grado. Facultad de Mecánica, Unidad Docente Metalúrgica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, ISPJAE, Ciudad de La Habana.

CALLEJA, J. 1982. Escorias y cementos siderúrgicos. Medellín, Colombia.

CONTRERA, H. Y. 2014. Cenizas de la tostación oxidante como material de construcción. Pedro Enrique Beyris Mazar (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

ERDOGAN, T. Y. 1997. Admixture for Concrete. Middle East Technical University. Press. Ankara.

FRÍAS, R. M. 2006. Características de la escoria de SiMn y su viabilidad como árido de reciclado en hormigones. Primer Congreso Nacional de Áridos. Zaragoza, España.

GEYER, R. M. T., GEYER, A., DALMILIN, D. C. C., y VILELA, A. C. F. 1997. Uso de escorias de aciaria como substituição ao cimento Portland – urna análise da melhoria das propriedades de concreto. IV Congresso Iberoamericano de Patologia de Construção, Porto Alegre, Brasil.

<http://www.cedexmateriales.vsf.es>. Ficha técnica. Escoria de horno de arco eléctrico

<http://www.nrmca.org>. National Ready Mixed Concrete Association

IHOBE, SA. 1999. Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería. Departamento de Ordenación del territorio, vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

JIMÉNEZ, M. P., GARCÍA, M. A. y MORÁN, C. F. 1982. Hormigón armado. Tomo I. Barcelona, España. Editorial Gustavo Gili S.A. ISBN 84 - 252 -0758-4: 13-18.

JUSTO, A. E. 2012. Evaluación preliminar de materiales cementantes suplementarios como aditivos al cemento para su empleo en apoyo a la construcción de viviendas de bajo costo en la Región de Sagua de Tánamo. Roger Samuel Almenares reyes (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 69 p.

LOSÁÑEZ, M. 2007. Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao. España.

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. Informe técnico 16.193.1, CSIC- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.

NC 120: 2007. Hormigón hidráulico-especificaciones

NC 173: 2002. Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.

NC 175: 2002. Mortero de albañilería. Especificaciones.

NC 178: 2002. Áridos. Análisis granulométrico.

NC 192: 2012. Hormigón hidráulico — Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.

NC 251: 2005. Áridos para hormigones hidráulicos—Requisitos.

NC 293: 2005. Código de buenas prácticas para el curado del hormigón.

NC 353: 2004. Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros—Especificaciones

NC 671: 2008. Áridos — Toma de muestras.

NC ASTM C 617: 2006. Hormigón —Refrentado de probetas cilíndricas

PÉREZ, E. 2008. Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

SOTO, I. O., SOTO, I. I. y DÍAZ, B. N. 2011. Evaluación de escoria de acería de horno eléctrico para su empleo como material de construcción. *Pesquisa e Tecnología, Minerva*, 6(3): 313-320.