



Instituto Superior Minero Metalúrgico  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Ingeniería Metalurgia-Química

# POLVO GENERADO POR LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO COMO SUSTITUYENTE PARCIAL DEL CEMENTO

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

Alexy Gómez Mariño

**Moa, julio 2014**



Instituto Superior Minero Metalúrgico  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Ingeniería Metalurgia-Química

# POLVO GENERADO POR LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO COMO SUSTITUYENTE PARCIAL DEL CEMENTO

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

Autor: Alexy Gómez Mariño

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

Tutor: Dr.C Pedro E. Beyris Mazar

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

Ing. Gualberto Rosales Martín.

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

**Moa, julio 2014**

Pensamiento



“En la tierra hace falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más y que esperen recibir menos y dar más, que digan mejor ahora que mañana”

# Che

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo va dedicado a todos aquellos que han contribuido de una forma u otra a mi formación.*

*A mis padres Oralia Mariño Cruz y Alexis Gómez Ricardo por su apoyo.*

*A mi hermana Annaliet Nayeska Gómez Mariño a quien exhorto a continuar sus estudios.*

*A toda mi familia y principalmente a mi bisabuelo: Martiliano Cruz, por su preocupación y por siempre creer en mí.*

*A mi novia Yaneiris Lao Pupo por su apoyo y ayuda.*

*A mis profesores, compañeros de estudios.*

*A mis amigos entrañables por alentarme a lo largo de mis estudios universitarios así, como aquellos que ya se graduaron y a los que se graduarán después de mí.*

*A todos ustedes ¡muchas gracias por ayudarme a crecer!*

## *AGRADECIMIENTOS*

*El desarrollo de este trabajo lleva implícito una serie de gratos esfuerzos y apoyo de muchas personas a las cuales quiero agradecer:*

*A mi mamá Oralia Mariño Cruz y mi papá Alexis Gómez Ricardo, que con su confianza y amor depositaron todo su empeño en mi realización.*

*A mi novia Yaneiris Lao Pupo, por su incalculable ayuda y confianza.*

*A mis suegros Martairis Pupo y Jorge Luis Lao, por su apoyo y comprensión.*

*A mis amigos y compañeros de estudio, por su reiterado apoyo incondicional.*

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

## RESUMEN

En ACINOX-Las Tunas se generan polvo en los hornos de arco eléctrico que es almacenado en vertederos que crean un serio problema ambiental. El presente trabajo tiene como objetivo: evaluar la utilización de los polvos generados por los hornos de arco eléctrico como agregado en las mezclas de morteros y hormigones como alternativa en la industria de materiales de construcción. Para ello se determinó la composición granulométrica de la materia prima, las propiedades físico- mecánicas de las mezclas de morteros y hormigón, antes y después de dicha sustitución. En los ensayos realizados se sustituyó el cemento en valores de 10 % a 50 % por el polvo generado en los hornos de arco eléctrico, la NC 173:2002 sirvió de apoyo para el diseño de las mezclas permitiendo establecer las dosificaciones más adecuadas según las aplicaciones investigadas en las mezclas, estas tienen que cumplir requisitos específicos de la resistencia a la compresión y flexión establecidos en las normas a los 7 días, 14 días y 28 días para los morteros a los 7 días y 28 días para los hormigones. Se obtuvieron valores de resistencia a la compresión entre 3,6 MPa y 5,6 MPa para los morteros y para los hormigones entre 13 MPa y 33 MPa, permitiendo disminuir el consumo de cemento en las mezclas estudiadas. Los resultados del trabajo permiten además, el empleo integral del polvo, un material que por décadas ha constituido un contaminante del medio ambiente

## **Abstract**

The dust generated in the electric arc furnaces at ACINOX-Las Tunas, is stored in dumps provoking a serious environmental issue. The current work is aimed to make an assessment of the use of the dust generated by the electric arc furnaces as an aggregate in mortar and concrete mixtures, as an alternative to be used by the construction material industry. In order to which, the particle size composition of the raw material was identified as well as the physical and mechanical characteristics of the mortar and concrete mixtures, before and after the current situation. During the performance of the trial the cement was exchanged with the dust generated in the electric arc furnaces in values between 10% and 50%. Regulation NC 173-2002 supported the design of the mixtures to determine the most appropriate doses as per the applications investigated in the mixtures, which have to meet specific requirements as per the standards of compressive and flexural strengths based on 7, 14 and 28 days for mortar and 7, 28 days for concrete. The values of compressive strength obtained were between 3, 6 and 5, 6 MPa for mortar and 13 and 33 MPa for concrete resulting in a reduction of the cement used in the assessed mixtures. The results of the present paperwork also allow the comprehensive use of dust, a material that has been an environmental pollutant for decades.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE	7
1.1 Generalidades	7
1.1.1 Términos más frecuentes	7
1.1.2 Conceptos básicos	10
1.2 Características generales de los materiales de construcción.	10
1.2.1 Los áridos en el hormigón.	12
1.3 Generalidades del cemento Pórtland.	13
1.3.1 Hidratación de cemento Pórtland.	14
1.4 Agua	15
1.5 Los hornos de arco eléctricos.	15
1.6 El uso de coproductos de la industria siderúrgica.	19
1.6.1 Aprovechamiento de los subproductos de la siderurgia.	19
1.7 Estado del arte	19
1.8 Conclusiones Parciales	24
2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Diseño de la Investigación.	25
2.2 Diseño de experimento.	25
2.3 Características de la planta generadora del residuo en estudio.	26
2.4 Toma y selección de la muestra de polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.	26
2.4.1 Tratamiento de la muestra de Polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.	27
2.5 Determinación de la composición química y granulométrica del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.	29
2.5.1 Composición química del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.	29
2.5.2. Preparación del polvo generado en los hornos de arco eléctrico para determinar la composición granulométrica.	30
2.6 Preparación de los morteros y hormigones.	32
2.6.1 Dosificación de los Morteros.	32
2.6.2 Preparación de las mezclas y confección de las probetas de hormigón.	34
2.7 Determinación de los ensayos de resistencia a los morteros y hormigones.	37



2.7.1. Ensayo de resistencia a la flexión.	38
2.7.2. Ensayo de resistencia a la compresión.	38
2.7.3 Determinación de la resistencia a la compresión para los hormigones.	39
2.8 Conclusiones parciales.	40
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	41
3.1 Resultados de la composición química y granulométrica realizada al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.	41
3.1.2. Caracterización de la composición granulométrica.	42
3.2 Evaluación de los resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros y hormigones.	43
3.2.1 Resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros de albañilería con cemento P – 350.	43
3.2.2. Resultados de los ensayos de flexión a las mezclas de morteros.	46
3.3 Conclusiones parciales	51
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54

## **INTRODUCCIÓN**

En la segunda mitad del siglo pasado investigadores e instituciones en el mundo se han interesado por desarrollar diversas tecnologías capaces de reciclar y aprovechar al máximo los residuales generados por la actividad productiva de las distintas industrias. La identificación y caracterización de los residuos sólidos y su ensayo como material de construcción, para incorporar al concepto de materiales útiles a una amplia gama de residuales que eran clasificados como desechos y la industria de materiales de la construcción los recicla por ser elementos de gran aporte a las cualidades de las mezclas de construcción, considerándolos como materiales alternativos, competitivos económicamente, con relación a los materiales naturales convencionales.

Estados Unidos, España, Japón, Italia, México, Colombia y otros países, trabajan e invierten en tecnologías, para aprovechar como material de construcción todo tipo de residuo que desde el punto de vista técnico y económico sea posible utilizar. Cuba en las últimas décadas realiza grandes esfuerzos encaminados a un desarrollo sostenible que permita la protección del medio ambiente, en este sentido se realizan estudios para el uso y reciclaje de materiales sólidos como: cenizas, escorias, escombros, residuales de la construcción, desechos sólidos de la industria minera y metalúrgica entre otros.

Centros científicos de altos estudios como: el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), la CUJAE, la Universidad Martha Abreu y los centros de investigación del Ministerio de la Construcción; destacan que existen en el país reservas de residuales con potencialidad para ser utilizados como materiales de la construcción y de esta forma eliminar elementos contaminantes para potenciar la calidad y cantidad de las estructuras destinadas a la construcción.

Todo proceso metalúrgico desde el punto de vista medio ambiental contamina el ecosistema, uno de estos procesos contaminantes es la industria siderúrgica, que con un historial de más de 40 años en la producción de aceros al carbono y en la fundición de piezas de aceros aleados e inoxidables, logró en 1992 materializar el viejo anhelo de producir aceros inoxidables con la inauguración de esta moderna planta en la provincia Las Tunas, diseñada y suministrada por la firma italiana DANIELI.

Esta planta está dotada de las instalaciones necesarias para producir 180 000 toneladas de aceros al carbono en el año, con niveles de calidad competitivos internacionalmente, constituyendo hoy día un importante eslabón del programa de desarrollo siderúrgico. En el mundo las producciones metalúrgicas son generadoras de importantes volúmenes de desechos entre los que se encuentran las escorias y el polvo generado en los hornos de arco eléctrico que representa un 15 Kg y 25 Kg por tonelada de acero, por lo que esto implica un grave problema para el ecosistema y la población cercana al lugar, que está propensa a la acción contaminante que pudieran generar estos.

Las recientes visitas y auditorías realizadas por el CITMA y las demás instituciones acreditadas para evaluar el comportamiento ambiental, han señalado su preocupación por el incremento de los desechos acumulados en el depósito asignado por la empresa para el vertimiento de los residuales y la necesidad de darle algún uso en el futuro con lo que se evitaría que en lo adelante pueda originarse un problema ambiental difícil de controlar, aspecto este que está identificado en el Plan de Manejo Ambiental elaborado por la Empresa ACINOX-Las Tunas.

Aun cuando se realiza un esfuerzo para dar solución a esta problemática existente no se cuenta con todos los recursos financieros necesarios ni con las tecnologías adecuadas para el tratamiento de estos contaminantes. Se exploran variantes y alternativas que minimicen el volumen de la carga contaminante, siendo una de estas la que se propone en este trabajo y ponerlo a disposición de las autoridades encargadas y a los proyectos locales como una variante para enfrentar y dar respuesta técnica a la escasez de material como un nuevo recurso aprovechable.

El trabajo realizado investigó la posibilidad de aprovechar este polvo generado por los hornos de arco eléctrico (HAE) de ACINOX-Las Tunas, como agregado en las mezclas de hormigones y morteros de la construcción e incorporarlo como un material más para que sea consumido por la Empresa de Materiales de la Construcción, su utilización significaría la disminución del consumo de cemento y el ahorro de materiales naturales.

Lo anterior indica la siguiente **situación problémica**: la existencia de grandes volúmenes de polvo generado por los HAE en ACINOX-Las Tunas como consecuencia de los procesos de producción de aceros que contaminan el medio ambiente y su insuficiente reutilización en el proceso de producción de aceros, lo que conlleva a la formulación del siguiente problema.

Por lo antes expuesto se identifica el siguiente **problema**: insuficiente conocimiento de la utilización del polvo generado por los hornos de arco eléctrico como agregado en las mezclas de morteros y hormigones en sustitución de sus similares.

El **objeto a investigar es**: las mezclas de morteros y hormigones con la adición del polvo generado por los HAE de ACINOX-Las Tunas.

Se define como **objetivo general**: evaluar la utilización de los polvos generados por los HAE como agregado en las mezclas de morteros y hormigones, como alternativa en la industria de materiales de construcción.

**Objetivos específicos son:**

- Caracterizar el polvo generado en los hornos de arco eléctrico en cuanto a: granulometría y ensayos químicos.
- Establecer las mezclas y dosificaciones más adecuadas, cuyas propiedades cumplan con las exigencias de las normas cubanas.
- Realizar pruebas mecánicas a los morteros y hormigones a las edades de ensayos.
- Valorar los resultados de acuerdo a las Normas Cubanas.

El **Campo de acción** lo constituyen las transformaciones físicas y mecánicas de las mezclas de morteros y hormigones con adición del polvo generado por los HAE de ACINOX-Las Tunas.

Para dar solución a este problema fue planteada la siguiente **hipótesis**: si el polvo generado por los HAE se adicionara como agregado en las mezclas de morteros y hormigones y estas cumplieran con las propiedades físico mecánicas, entonces se podría utilizar como material de la construcción.

Durante la investigación se utilizaron diferentes métodos dentro de los que se señalan

### **MÉTODOS TEÓRICOS**

- **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 del polvo generado por los hornos de arco eléctrico.
- **Estadístico porcentual**: se utilizó para determinar los porcentajes de los resultados obtenidos.

### **MÉTODOS EMPÍRICOS:**

- **Observación participante**: fue necesario para corroborar las necesidades de eliminar el depósito del polvo generado por los hornos de arco eléctrico.

### **Las tareas de la investigación**

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con el polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas utilizado como material de construcción.
- Toma de muestras y su preparación.
- Caracterización del polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas desde el punto de vista físico y químico.

- Diseño de las dosificaciones de los materiales según las aplicaciones a ensayar.
- Realización de 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 para los hormigones como establecen las normas cubanas.
- Evaluación de los resultados obtenidos para determinar las dosificaciones más adecuadas.

#### **Aportes que se esperan de la investigación:**

##### **En el aspecto tecnológico:**

- La incorporación de un nuevo producto a las mezclas de morteros y hormigones.
- Abrir el campo de aplicación del polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas para ser empleado con los materiales de la construcción y que pueda ser ensayado y evaluado.

##### **En lo metodológico:**

- Proporcionar a la industria de materiales de construcción, una base de datos que proporcione las dosificaciones y mezclas a realizar, para elaborar morteros y hormigones con los polvos generado por el horno de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

##### **El aporte social del trabajo se aprecia en:**

- La posibilidad real para la industria de la construcción y la población de utilizar un material existente en la localidad, propiciando el desarrollo de las construcciones locales en 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 costos de preparación para su utilización.

**En el aspecto ambiental:**

El empleo a escala industrial del polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas permitirá eliminar un contaminante que por décadas ha afectado el ecosistema de la provincia de Las Tunas.

## **1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE**

Se definen algunos conceptos básicos empleados en la investigación que están establecidos en las normas cubanas (NC 54 - 395:1987, NC 526:2007, NC 175:2002 entre otras) y se resumen los estudios realizados sobre la investigación bibliográfica de trabajos realizados por investigadores (como: Alejandro Salazar J. 2005, Caballero Badillo C. 2011, Mateos de Vicente M. 2001 y otros), lo cual queda expresado en el estado del arte.

### **1.1 Generalidades**

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

#### **1.1.1 Términos más frecuentes**

**Árido:** material granulado procedente de rocas trituradas natural o artificialmente, cuyas dimensiones varían desde 0,074 mm hasta un tamaño máximo específico, el cual puede llegar a ser en caso especial de 250 mm o 300 mm. Así lo define la NC 54:395:1987.

**Arenisca:** mezcla de arena, término geológico dado al material procedente de las rocas cuya composición es cuarzo-feldespático con predominio del cuarzo. Areniscas cuarzosas cuarcificadas de color gris con tonalidades pardo-rojizo, de textura estratificada, estructura de granos finos medios redondeados.

**Fracción:** porción de árido expresada por los números que representan las aberturas nominales o equivalentes, en mm de dos tamices normalizados, donde el número mayor, denominado límite superior corresponde al tamiz de mayor abertura y el



segundo denominado límite inferior corresponde al de menor abertura donde queda retenida prácticamente su totalidad.

**Adición:** material que en una cantidad limitada, es molido simultáneamente o mezclado con el cemento hidráulico durante su fabricación. Se conocen dos tipos de adición: la funcional y la coadyuvante del proceso NC 526:2007.

Se define como adición en la NC 175:2002, el material inorgánico finamente dividido (ni árido, ni aglomerante) que se puede añadir al mortero para mejorar determinadas propiedades u obtener ciertas propiedades particulares.

**Aditivo:** son sustancias que, agregadas al hormigón, cuando aún no está endurecido, producen una mejora en alguna de sus propiedades (ejemplo: cambios en el tiempo de fraguado, mejora del manejo del hormigón, etc.) es necesario conocer muy bien el funcionamiento de los aditivos, ya que un abuso de los mismos puede originar efectos perjudiciales. Los aditivos pueden ser artificiales y naturales.

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.

**Los agregados o adiciones:** son materiales naturales o artificiales de origen mineral activos o inertes, incorporados al cemento en su fabricación o al concreto en su preparación. En este último se considera como un quinto elemento. Las más conocidas son:

- Las Cenizas Volcánicas
- El Fly Ash
- Ceniza de Cáscara de Arroz
- Polvo de Ladrillo
- Escorias Siderúrgicas
- Calizas
- Polvos generados por los hornos metalúrgicos

Los agregados están definidos por la norma ASTM C-125, como materiales granulados tales como: arena, grava, piedra triturada o escoria de altos hornos siderúrgicos, que son utilizados con un medio cementante para formar concretos o morteros de cemento hidráulico.

**Cemento:** cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clinker de cemento Pórtland y usualmente contiene sulfato de calcio. NC 526:2007.

**Cenizas:** es un término bastante mencionado en la práctica industrial pues existen diversos materiales a los cuales se les nombran como cenizas, atendiendo a la procedencia, el tipo de proceso al que es sometida, según sus propiedades y su uso, entre otras. Las mismas son el resultado de la combustión de distintos materiales comburentes o por la aplicación de procesos pirometalúrgico a minerales.

La norma ASTM C-618 en su especificación abarca el empleo de la ceniza volante, la puzolana natural o la adición mineral al hormigón. Define tres clases de puzolanas: N, F y C:

- N son las puzolanas naturales o calcinadas: tierras diatomeas, sílice opalina, esquistos arcillosos; tobas, cenizas volcánicas, pumicitas y arcillas calcinadas.
- F identifica a la ceniza volante de la combustión del carbón antracítico o bituminoso.
- C es la ceniza volante puzolánica y cementante a la vez, producto de la combustión de carbón lignítico y sub-bituminoso.

**Ceniza de la tostación oxidante:** es un residuo o subproducto procedente de un proceso pirometalúrgico que se realiza en un horno de soleras múltiples empleando el método de tostación por oxidación.

**Polvo generado en los hornos de arco eléctrico:** es un residuo o subproducto proveniente de un proceso pirometalúrgico realizado en hornos de arco eléctrico como resultado del proceso de fusión de la carga.

**Hormigón:** mezcla formada por cemento, grava, arena, agua y en ocasiones aditivos; que al fraguar conforma un material compacto y resistente.

**Mortero:** mezcla de cemento, arena y agua.

### 1.1.2 Conceptos básicos

**Fraguado:** tiempo que demora en endurecerse una pasta conformada con cemento, agua y otros agregados.

**Muestra:** parte o porción extraída de un conjunto por métodos que permiten considerarla como representativa del lote al que pertenece.

**Yacimiento:** concentración natural o artificial de uno o más minerales que contengan algún elemento de interés y la extracción de éste reviste alguna importancia económica.

**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.

**Puzolanas:** el código ASTM 618:78 (1992), define: “las puzolanas son materiales silíceos o aluminio–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”.

**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.

## 1.2 Características generales de los materiales de construcción.

Los materiales constructivos pueden ser clasificados según su origen en:

- Materiales pétreos naturales (rocas de todo tipo);
- Materiales pétreos artificiales (piedra artificial, cerámicas, vidrios);
- Materiales aglomerantes (cales y cementos) y aglomerados (hormigones);
- Materiales metálicos (hierro, acero);
- Materiales orgánicos (madera, corcho);
- Materiales plásticos.

Las rocas constituyen materiales de construcción tradicionales utilizados desde tiempos prehistóricos y forman parte de los materiales pétreos naturales. Son adecuadas para la construcción, todas aquellas que por sus condiciones de compacidad y dureza son aptas para ser talladas. Existen muchas variedades, siendo las más habituales la arenisca, granito y la caliza, entre otras.

Entre los materiales pétreos artificiales se cuenta la propiamente denominada piedra artificial, muy usada en la construcción, de propiedades y aspecto análogo a algunas piedras naturales, formando bloques de hormigones compuestos de cemento y arena, gravilla, etc. El ladrillo, situado también en este grupo, pertenece a la rama de la tejería o de los productos cerámicos que adquieren consistencia por procesos físicos como la cocción. Es una masa de arcilla cocida, en forma de paralelepípedo rectangular, que posee destacadas cualidades de resistencia, rigidez y duración. También el vidrio pertenece al grupo de los materiales pétreos artificiales, según la clasificación de Orus Asso, obteniéndose por la fusión de ciertos óxidos.

Los materiales aglomerantes son aquellos que tienen la propiedad de adherirse unos a otros y se usan en construcción para unir los materiales, para recubrirlos o bien para formar pastas llamadas morteros u hormigones que pueden extenderse o disponerse en moldes, encofrados, que al secarse adquieren el estado sólido. Entre los más habituales figuran la cal, el cemento, el yeso, etc.

El primer aglomerante utilizado en la historia fue la arcilla y en los países cercanos al Mar Muerto (Asiria, Babilonia), el betún. La cal, óxido de calcio, es una sustancia que al contacto con el agua se hidrata y al mezclarla con arena forma la argamasa o mortero.

El cemento es un compuesto natural o artificial formado a base de cal cocida y pulverizada, mezclando un aglomerante, cemento, arena, grava o piedra machacada y agua obteniéndose así el hormigón. Para darle forma se utilizan unos moldes de madera o metálicos (encofrados), dentro de los cuales se seca y adquiere las características de un bloque sólido. Estos bloques deben ser incluidos en el grupo de

materiales aglomerados, obtenidos por moldeo de una sustancia granulada. El hormigón ya se utilizó en Asia y Egipto. En Grecia existieron acueductos y depósitos de agua hechos con este material, y en Roma se empleó en la construcción de las grandes obras públicas. Antes del descubrimiento del cemento (siglo XIX) se usaban como aglomerantes las cales grasas e hidráulicas.

Es conveniente destacar que se denomina comúnmente árido a una serie de rocas que, tras un proceso de tratamiento industrial (simple clasificación por tamaños en el caso de los áridos naturales, o trituración, molienda y clasificación en el caso de los áridos de machaqueo), se emplean en la industria de la construcción en múltiples aplicaciones, que van desde la elaboración, junto con un material ligante, de hormigones, morteros y aglomerados asfálticos, hasta la construcción de bases y sub-bases para carreteras, balastos y sub-balastos para las vías de ferrocarril, o escolleras para la defensa y construcción de puertos marítimos. (Lueges, 2008).

### **Los áridos en el mortero**

La NC 175:2002, acápite 4.2. Áridos minerales, explica que: los áridos deben cumplir con las especificaciones que establecen las normas cubanas: NC 54:264:1984, (177 a la 190):2002, 251:2005 y la 671:2008. Los áridos para repello o resano grueso y colocación debe pasar por el tamiz de 4,76 mm; para resano fino el árido debe pasar por el tamiz de 2,38 mm ó 1,19 mm en dependencia del acabado final deseado.

En la fabricación de morteros de albañilería se pueden utilizar otros áridos minerales siempre que se haya demostrado que proporcionan al mortero propiedades descritas en esta norma y que no ejercen efectos perjudiciales sobre los demás componentes de las mezclas (Ej. se produzcan reacciones químicas que alteren las propiedades físicas y mecánicas de alguno de los agregados o de la mezcla elaborada).

#### **1.2.1 Los áridos en el hormigón.**

Las propiedades exigidas en los áridos para utilizarlo en hormigón son: que sean químicamente inertes, duraderos, duros, resistentes a los esfuerzos mecánicos, de forma aproximadamente cúbica después de triturado y capaz de dar una buena adherencia con la pasta de cemento.

En el hormigón se utilizan por lo general áridos con un tamaño que no rebase los 76,0 mm. Para poder garantizar una granulometría adecuada en el hormigón, se producen en las canteras diferentes grupos de áridos donde cada grupo contiene varias fracciones de tamaño. Convencionalmente se han clasificado en áridos finos (arena) formados fundamentalmente por partículas menores que 4,76 mm ó 5,0 mm y áridos gruesos (granitos, gravillas, piedras, macadán) formados por partículas fundamentalmente mayores que los tamaños que caracterizan a estos productos, según expresa De Armas J. 2008.

### **1.3 Generalidades del cemento Pórtland.**

El cemento Pórtland es un aglomerante hidráulico inorgánico, polifásico artificial, que se obtiene a partir de un producto intermedio denominado clinker, que no es más que una mezcla en proporciones preestablecidas de carbonato de calcio (caliza) y de un aluminosilicatos (arcillas o margas) u otros materiales de una composición similar, previamente molidos y homogeneizados que generalmente son calcinados en hornos rotatorios a una temperatura de 1480 °C aproximadamente.

Durante el proceso de calcinación se produce una fusión parcial y una recombinación de los componentes de las materias primas dando lugar a nódulos de clinker de 5-50 mm de diámetro, que esencialmente consisten en silicatos de calcio hidráulicos. Posteriormente el clinker es mezclado con un 5 % de yeso (sulfato de calcio dihidrato) y se somete a un proceso de molienda del cual resulta el cemento Pórtland.

Su nombre está dado por su semejanza, una vez fraguado, con la famosa piedra caliza blanca-plateada que se extraía de unas canteras existentes en la pequeña península de Pórtland, en la costa sur del Condado de Dorset, en Inglaterra.

Durante la década del 90, la producción de cemento Pórtland creció un 55 % en los países en vías de desarrollo, en comparación con un crecimiento de solo el 3 % en los países desarrollados, y se espera que para el año 2020 la demanda de aglomerantes sea de un 120 % a un 180 % mayor con respecto a los niveles alcanzados en 1990, debido fundamentalmente al crecimiento de los países en vías de desarrollo (Aitcin, 2000).

La composición química media de un cemento Pórtland, según Calleja (1974), está formada por un 62,5 % de CaO, 21 % de SiO<sub>2</sub>, 6,5 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, un 2,5 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros minoritarios.

Estos son los cuatro componentes principales del cemento Pórtland, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres. Estos componentes no se encuentran libres en el cemento, sino en forma de silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los componentes hidráulicos del mismo o componentes potenciales.

Un clinker de cemento Pórtland de tipo medio contiene:

Silicato tricálcico (3CaO·SiO <sub>2</sub> ).....	40 % a 50 %
Silicato bicálcico (2CaO·SiO <sub>2</sub> ).....	20 % a 30 %
Aluminato tricálcico (3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	10 % a 15 %
Aluminato ferrito tetracálcico (4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	5 % a 10 %

### **1.3.1 Hidratación de cemento Pórtland.**

Cuando el cemento Pórtland es mezclado con agua ocurren una serie de reacciones químicas responsables del endurecimiento de la pasta que son designadas genéricamente como reacciones de hidratación, y los compuestos químicos resultantes de estas reacciones, como productos de hidratación o hidratos. La hidratación del silicato tricálcico (3CaO·SiO<sub>2</sub>) impuro, también llamado Alita, conduce a la formación del hidróxido de calcio (Ca (OH)<sub>2</sub>), también denominado portlandita y de silicatos de calcio hidratados con una estructura amorfa y de estequiometría variable, que son denotados de manera genérica como silicato de calcio hidratado (CaO. SiO<sub>2</sub>. H<sub>2</sub>O).

El silicato tricálcico es el compuesto activo por excelencia del cemento pues desarrolla una resistencia inicial elevada y un calor de hidratación también elevado.

Fragua lentamente y tiene un endurecimiento bastante rápido. En los cementos de endurecimiento rápido y en los de alta resistencia aparece en una proporción superior a la habitual.

El silicato bicálcico es el que desarrolla en el cemento la resistencia a largo plazo, es lento en su fraguado y en su endurecimiento. Su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico, por ello los cementos resistentes a los sulfatos llevan un alto contenido de silicato bicálcico. El aluminato tricálcico es el compuesto que gobierna el fraguado y las resistencias a corto plazo. Su estabilidad química es buena frente al agua de mar pero muy débil a los sulfatos. Para retardar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento se añade al clinker piedra de yeso. El Aluminato ferrito tetracálcico no participa en la resistencia mecánica, su presencia es necesaria por el aporte de fundentes de hierro en la fabricación del clinker.

#### **1.4 Agua**

Sustancia líquida cuya función es la de humedecer los componentes sólidos de la mezcla, garantiza el mezclado y homogenización de estos y durante el secado provoca el fraguado del mortero y el hormigón.

En la elaboración de estas mezclas se puede añadir el agua industrial o el agua potable y se evalúa como parámetro de control el grado de dureza que posee.

Clasificación de las aguas por su dureza atendiendo al contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ):

- Muy blandas.....0 a 70 ppm de  $\text{CaCO}_3$
- Blandas.....70 a 140 ppm de  $\text{CaCO}_3$
- Moderadamente duras.....140 a 267 ppm de  $\text{CaCO}_3$
- Duras.....267 a 427 ppm de  $\text{CaCO}_3$
- Muy duras.....427 a 534 ppm de  $\text{CaCO}_3$
- Extremadamente duras.....mayor que 534 ppm de  $\text{CaCO}_3$

*Nota: ppm = partes por millón = 1 mg/l*

#### **1.5 Los hornos de arco eléctricos.**

Los hornos de arco eléctricos generan gases de escape, que al salir del horno, arrastran numerosas partículas finas. Estas partículas, denominadas usualmente



polvos de horno eléctrico, están compuestas por elementos provenientes de la carga (chatarra, cal, carbón y ferroaleaciones) y materiales de reparación, donde los elementos químicos fundamentales que los componen son el hierro, cinc, calcio, magnesio, metales pesados como el plomo y el cadmio, silicio entre otros.

La presencia de estos metales implica que el polvo se clasifique como residuo peligroso. La EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, lo hizo así en 1980 y diversos países y regiones se sumaron posteriormente. La cantidad de partículas generadas varía de planta a planta, pero se estima un mínimo de 15 kg/t y un máximo de 25 kg/t.

Estos polvos, que antes se arrojaban a la atmósfera a través de la chimenea, perjudicando el ambiente laboral y geográfico, ahora se recuperan en las casas de humos. Una vez recuperados surge el interrogante de qué hacer con ellos. Inicialmente, los polvos se depositaron en terrenos propios o en depósitos de terceros. Luego surgió la posibilidad de reciclarlos externamente, a partir del aprovechamiento de su contenido de óxido de cinc.

Si se mira a las industrias siderúrgicas y del cinc como un conjunto, es importante tener en cuenta que el 80 % del cinc producido se destina a galvanizar acero. Además, tiende a crecer la demanda de chapa galvanizada y por ende la proporción de chatarra de acero galvanizado. Se puede prever un incremento del contenido de cinc en los polvos de horno eléctrico. Se podría interpretar también que los procesos de reciclado de polvos, al generar materias primas para la industria del cinc, cierran el círculo entre ambas industrias.

**Tabla 1.1** Alternativas actuales para el manejo de los polvos de hornos de arco eléctrico:

Alternativa	Variantes	Localización actual	Comentarios
Depósito	Sin tratamiento.	En siderurgia; en terceros.	La legislación ambiental tiende a prohibirlo.
	Con tratamiento de insolubilización de metales pesados.	En siderurgia; en terceros.	Legalmente se trata como depósito de sustancia no peligrosa. Tecnología Super Detox y otras.
Reciclado	En el mismo horno eléctrico de arco.	En siderurgia.	Para subir el porcentaje de cinc y venderlo a productores.
	Para la obtención de óxido de cinc.	En terceros independientes o productores de cinc u óxido de cinc.	Compite con la minería del cinc. Waelz es el proceso dominante, pero hay otros (Mitsui Furnace, Flame Reactor, proceso electro-térmico, Scan Arc).
	Para la obtención de arrabio y óxido de cinc.	En empresa de reciclados perteneciente a un grupo siderúrgico.	Proceso PRIMUS.

El aumento de la producción de acero por la vía de hornos de arco eléctricos, para revestir las chapas de acero con cinc y prevenir su corrosión, provocando así la proporción de chatarra galvanizada a disponer en el futuro, más las exigencias ambientales crecientes, son factores que permiten prever que el reciclado de los polvos de hornos de arco eléctricos seguirá creciendo, más allá de la coyuntura actual. Las alternativas disponibles son variadas pero tienen un costo. La colaboración entre las industrias del cinc y del acero, los desarrolladores de tecnología y los proveedores de equipamiento pueden aliviar la carga y aportar soluciones sustentables con beneficio para las empresas y la comunidad.

**Tabla 1.2.** Generación y reciclado de polvos de horno eléctrico y producción de cinc a partir de esos polvos, en distintas regiones del mundo.

	Región	1991	1996	2001
Generación de polvos (x 1.000 t/año)	Europa Occidental	530	600	670
	América del Norte	520	675	780
	Japón	450	495	520
	Resto del mundo	580	650	720
	Total	2080	2420	2690
Polvos tratados para producir cinc (x 1.000 t/año)	Europa Occidental	230	350	420
	América del Norte	350	450	500
	Japón	240	370	450
	Resto del mundo	70	120	250
	Total	890	1290	1620
Porcentaje de polvo tratado	43	53	60	
Contenido promedio de cinc (%)	15	18	20	
Capacidad de tratam. faltante (x 1.000 t/año)	1.170	1.130	1.070	
Cinc recuperado del polvo (x 1.000 t/año)	Europa Occidental	41	63	84
	América del Norte	54	81	110
	Japón	35	66	80
	Resto del mundo	4	22	50
	Total	134	232	324
Cinc «perdido» (x 1.000 t/año)	175	203	214	

En América Latina, si bien predomina ampliamente el depósito sin tratamiento en terrenos preparados a ese efecto, se están dando pasos importantes en el reciclado de los polvos.

Al introducirse en las acerías eléctricas los sistemas de recolección de humos, comenzó el problema sobre qué hacer con los polvos recuperados en los filtros. La primera solución, todavía utilizada, fue la de los depósitos, ya sea en terrenos propios de las siderúrgicas o bien en terceros (en Alemania, por ejemplo, se utilizaron minas abandonadas). Debido a la presencia de metales pesados que pueden ser lixiviados y contaminar napas y corrientes de agua, los requisitos legales para los depósitos fueron creciendo. Se exigieron precauciones especiales para evitar esa incorporación de metales pesados. Posteriormente, en algunos países se comenzó a exigir que el polvo a depositar pasara por un tratamiento de estabilización, para permitir un manejo como residuo no peligroso.

## **1.6 El uso de coproductos de la industria siderúrgica.**

En la búsqueda de una industria cada vez más sustentable, diversos organismos técnicos trabajan en forma permanente por encontrar el uso adecuado a los residuos de la siderurgia. En forma resumida se presentan las líneas de investigación que están siendo desarrolladas por tres importantes centros de trabajo dedicados a este tema en América Latina.

### **1.6.1 Aprovechamiento de los subproductos de la siderurgia.**

Las empresas argentinas junto al Instituto Argentino de Siderurgia (IAS) están trabajando en un mejor aprovechamiento de los subproductos de la siderurgia en diversos ámbitos, que se resumen a continuación:

Recuperación de polvos de convertidores: Se estudió el briqueteado de subproductos y ligantes en los laboratorios, con verificación posterior a escala industrial. Hoy es rutinario incorporar como carga fría a los convertidores, un porcentaje de estas briquetas conteniendo polvos y barros, laminilla de colada continua y otros materiales como polvo Ruthner (recuperación de residuos de decapado).

Briquetas para hornos eléctricos: Es habitual briquetear finos de Reducción directa (REDI). Se realizaron estudios incorporándoles un porcentaje de polvo de casa de humos con resultados exitosos a escala industrial.

Si bien el avance ha sido importante, las tareas en este sentido son permanentes, siendo para el IAS un objetivo estratégico acompañar a las empresas en este camino.

## **1.7 Estado del arte**

Para el desarrollo de la investigación se revisó y consultó el criterio de diferentes investigadores y especialistas que han trabajado temas similares al que ocupa este trabajo, se exponen a continuación:

Aprile A. et al, 1999, caracteriza las cenizas de centrales eléctricas y expone la utilización de las cenizas volantes en la fabricación de cementos y del clinker para cementos, además de utilizarla en la producción de hormigón y prefabricados de hormigón con cenizas. Considera el reciclaje de estas cenizas generadas por la combustión del carbón y otros combustibles, una alternativa para disminuir los costos de producción de energía y evitar la contaminación ambiental por el vertimiento en depósitos. Además de disminuir el consumo de cemento en las mezclas y se agrega en la producción de cemento incrementando su producción y disminuyendo el costo de este, pero solo ofrece una información teórica sobre el tema sin llegar a realizar experimentos ilustrativos.

Contrera H. Y. (2014), hace un estudio acerca de la utilización de las cenizas de la tostación oxidante como compuesto en morteros y hormigones el cual le dio como resultado que el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de morteros y hormigones, diseñadas con la adición de 10 % de cenizas de la tostación oxidante mostraron valores de resistencia a la compresión para los morteros entre 5,3–11,3 MPa y para los hormigones 17,3 MPa, superiores a los exigidos por la muestras patrones, esto permite un ahorro de 25 kg a 60 kg de cemento por cada 1,0 m<sup>3</sup> de mezcla preparada, según su aplicación. Para los hormigones se alcanzan valores de consumo de 1,0 kg de cemento por 1,0 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia con la adición de las cenizas de la tostación oxidante, pero no realizó la sustitución para los distintos porcentajes lo que se debe realizar para un mejor conocimiento y aprovechamiento del material, parecido interés se quiere lograr con el polvo, lo que en el trabajo se abarca más en el porcentaje de sustitución.

Amaral de Lima L. 1999 en su tesis doctoral, realiza un trabajo investigativo sobre la utilización de la escoria de acero en horno eléctrico para 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, 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. Estas escorias no presentan similitud con el polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

En un artículo realizado por Mateo de Vicente, 2001. Se refiere al empleo de las cenizas volantes en la construcción de firmes, terraplenes, ladrillos y como aditivo al hormigón, al asfalto y a algunas tierras agrícolas. Se pueden transformar en otros productos, como la lana de vidrio. El autor descubrió que algunas de ellas eran un auténtico cemento, al que llamó "cemento Mateos", que por estar depositadas en el vertedero suponían ser el cemento más barato del mundo. En España se producía entonces unos 10 millones de toneladas al año de cenizas. Desde 1965 trató de informar, a través de artículos, conferencias, y envíos masivos por correo, sobre el empleo de este material y los grandes ahorros que ello supondría, aunque no lo comercializó en aquel entonces. Por lo que no fue considerado como un trabajo relevante y útil, pero con el transcurso de los años finalmente consiguió que gran parte de las cenizas se utilicen con el cemento y fueron vendido como cemento puzolánico. Similar interés se persigue con este trabajo al demostrar la posibilidad de aplicar el polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas como material de construcción para promover su utilización masiva.

Salazar J. A 2005, expone las dosificaciones elaboradas con escorias siderúrgicas a porcentajes de adición que varían entre 0 % y 60 % y la resistencia a la compresión oscila entre 23 MPa 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 constructivo (casas urbanas, edificios de 8 pisos, plazas públicas, pavimentos, etc.) realizados completamente con estos materiales ecológicos (ladrillos, bloques, hormigón, mortero).

Frías Rojas M. 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 15x30 cm a 28 días de curado y 45 MPa para una edad de curado de 90 días) estos son resultados buenos, ya que se realizaron sustituyendo el 100 % del árido en la mezcla elaborada. No se evalúa el comportamiento cuando se sustituyen fracciones del árido, además la composición química realizada a esta escoria es diferente al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

Berridi Aguirre I. 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.

Canadá, Estados Unidos y Alemania son pioneros a nivel mundial en la utilización de cenizas para la industria de la construcción. Colombia y México realizan estudios al respecto y han obtenido resultados alentadores según Caballero Badillo C. 2011;

quien además dice: Lo que antes fue "basura", ahora es un recurso para los ingenieros. En efecto, las cenizas que quedan de la combustión del carbón son utilizadas, en casi todo el mundo, para construir. Cuando el carbón es quemado en el proceso de generación de energía eléctrica quedan las cenizas volantes (fly ash) como material de desecho que contamina el medio ambiente. La utilización de este residuo en la construcción ha propuesto una solución a este problema ambiental y además ha logrado disminuir los costos de los materiales empleados en este campo hasta en un 16 %, pero no propone una guía de utilización de este material ni la ceniza tiene concordancia en composición química con el polvo en estudio.

Soto Izquierdo O, Soto Izquierdo I. y Díaz Brito N. 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 granulométrico, pero no realizaron los ensayos correspondiente a la utilización de estas escorias en los morteros y hormigones para determinar el comportamiento de las variables resistencia a la compresión y flexo-tracción 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.

El doctor Martirena F. et al., 2012, ha estudiado la activación de arcillas de bajo grado para la producción y uso de puzolanas como sustitutos de clinker en sistemas cementicios ternarios (Clinker-metakaolin-carbonato); este trabajo de alto valor científico y económico analiza la incorporación de elementos puzolánicos en el cemento; se logra sustituir hasta el 25 % de cemento y el clinker en el cemento se sustituye hasta el 60 %; este proyecto requiere del uso de energía para el proceso de activación de las arcillas. La investigación relacionada con el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas no investiga como incorporarlo en el cemento, sino en los morteros y hormigones directamente.

Artiles Álvarez J. 2012 evaluó las tobas zeolitizadas de Cayo Santamaría en Villa Clara (yacimiento Tasajeras), para agregarlas en las dosificaciones de hormigón en un 10 % sustituyendo parte del cemento en las mezclas, cribando la zeolita a 0,8 mm



y se obtienen valores promedios de resistencia a la compresión de 32,3 MPa a los 7 días y de 42,9 MPa a los 28 días superiores a los exigidos por las normas cubanas. Similar estudio se realiza con el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas para diversas mezclas; la diferencia consiste en que la zeolita es un mineral y polvo es un residuo industrial.

### **1.8 Conclusiones Parciales**

EL estudio realizado a las bibliografías anteriormente analizadas hace una evaluación de las escorias de hornos metalúrgicos en la producción de aceros, cenizas volantes procedentes de la combustión en centrales eléctricas, residuos sólidos de la demolición de edificaciones y residuos sólidos generados por la actividad humana.

- Las investigaciones están centradas en la posibilidad de poder darle uso a un desecho que contamina el medio ambiente, los que se ensayan fundamentalmente en la elaboración de cementos o sustituyendo algunos contenidos parciales de las materias primas que se consumen en la elaboración de los cementos, para demostrar esto los autores realizaron una serie de ensayos añadiendo dichos materiales de forma directa en las mezclas de los morteros y hormigones.
- No se conoce investigación alguna, en la que se evalúe el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas para ser utilizada como adición en la preparación de mezclas de morteros y hormigones, como una alternativa de utilización en la industria de materiales de construcción.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

En el presente capítulo se describen los principales materiales y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación. El material que se investiga (polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas), puede ser empleado en la construcción como agregado en las mezclas de morteros y hormigones; se requiere de la definición de los métodos a desarrollar en la investigación.

### **2.1 Diseño de la Investigación.**

De acuerdo con las literaturas consultadas, las principales pruebas que determinan la utilidad del polvo generado en los hornos de arco eléctrico son: los ensayos de resistencias mecánicas a probetas elaboradas con dicho material, específicamente la resistencia a la flexión y la compresión.

### **2.2 Diseño de experimento.**

Por la sencillez y la rapidez de la obtención de los resultados, el método tradicional de experimentación, en las investigaciones exploratorias, lo hacen 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.

Para el estudio de la actividad de la mezcla se analizará solamente la influencia de la presencia del polvo en la resistencia mecánica de los morteros con sustitución parcial del 10 % al 50 % de cemento Pórtland P-350 por el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas para los morteros.

En el caso de hormigón, se decidió analizar la sustitución del 15 % de cemento Portland P-350 por el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las

Tunas para diferentes niveles de resistencia (10, 15, 20, 25 y 30 MPa) a la compresión.

### **2.3 Características de la planta generadora del residuo en estudio.**

La planta de aceros inoxidables de Las Tunas está ubicada en una de las zonas industriales más importantes del país, a 4 km del centro de Las Tunas, ciudad de .125 000 habitantes y capital de la provincia Las Tunas, distante 700 km al este de Ciudad de La Habana. Su localización en la región oriental del país la sitúan en el entorno de la planta niquelífera; a 280 km de Moa. La planta tiene comunicación por carretera y vías férreas con todo el país, lo cual permite el acceso directo de materias primas u otros insumos necesarios para la producción, así como la extracción del producto terminado desde la propia fábrica hasta su puerto de embarque u otro destino dentro del territorio nacional. Por vía marítima en la costa norte oriental a 70 km de la instalación se localiza "Puerto Carúpano" de 26 pies de calado, el cual está debidamente equipado con grúas móviles de 20 y 25 toneladas, que pueden operar desde equipo ferroviario y automotor a barco y viceversa. Esta planta cuenta con un depósito asignado para el vertimiento del residuo en análisis, el cual desde los últimos cuatro años está acumulando grandes volúmenes de este polvo a un ritmo de 1 950 000 kg a 3 250 000 kg cada año.

### **2.4 Toma y selección de la muestra de polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX Las Tunas.**

La muestra se tomó de modo puntual en la descarga del transportador sinfín de la planta depuradora de gases, truncando totalmente el flujo cada 5 minutos durante todo el tiempo de evacuación del polvo transportado por los sinfines que están acoplados al sistema de evacuación de esta, figura 2.1 permitiendo así la formación de una muestra compósito de aproximadamente 5 kg. Este proceso se efectuó en tres días consecutivos en el horario comprendido entre las ocho y nueve de la noche correspondiente al horario pico y planta parada, sometiendo cada una de las muestras a homogenización y cuarteo por el método de cono y anillo a partir de lo cual obtuvimos dos porciones iguales de muestras empleando una de ellas para el análisis granulométrico y la otra para el análisis químico.



**Figura 2.1.** Planta depuradora de gases.

#### **2.4.1 Tratamiento de la muestra de Polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.**

El polvo generado en los hornos de arco eléctrico presenta una granulometría de 2 mm lo que nos permite aplicar el análisis en cribas de laboratorio por vía seca. Las rejillas de las cribas de laboratorio se extienden dentro de un aro cilíndrico de 200 mm de diámetro y 50 mm de alto. El borde inferior tiene un diámetro algo menor que el borde superior, lo que permite componer un conjunto de cribas.

#### **Aparatos, utensilios y medios de medición.**

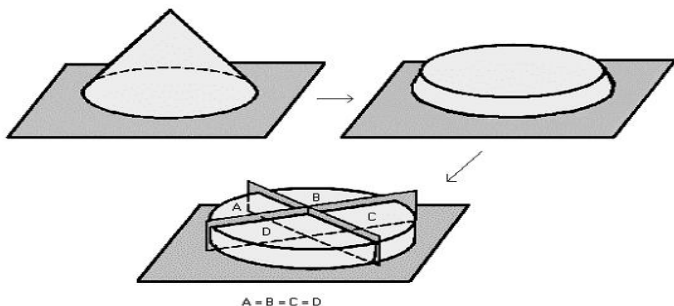
- Conjunto de cribas de laboratorio.
- Balanza Analítica.
- Cuchillos, espátulas, palas, cucharas, paños y cuarteadores, según se requiera.

#### **Selección de la muestra.**

- Se tomará una muestra de polvo aproximadamente de 5 kg cada una de ellas durante tres días consecutivos.
- Cada una de estas muestras se homogeniza y se cuarte, empleando una parte de ella para el análisis granulométrico y la otra para el análisis químico.

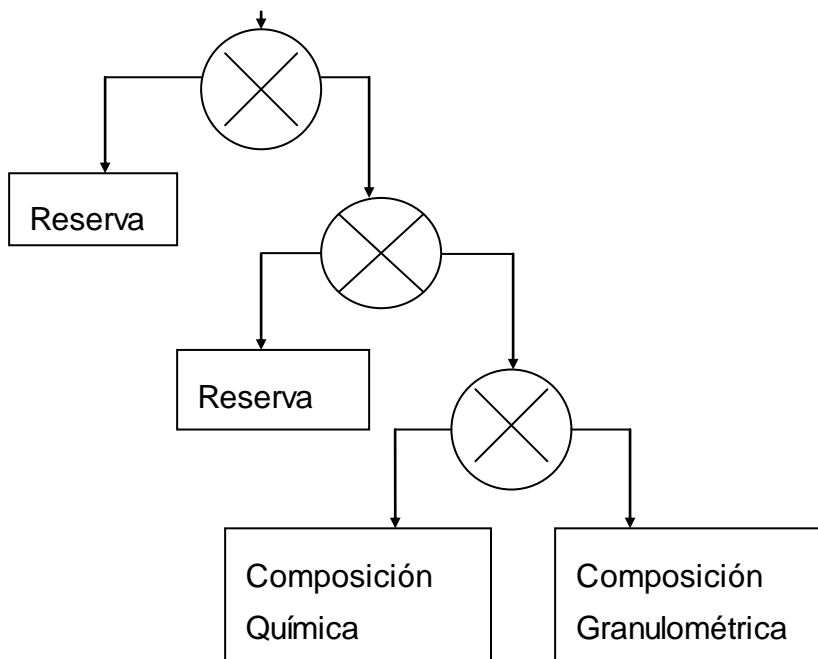
Después que se obtiene la muestra necesaria se envía al laboratorio para obtener los resultados de la composición granulométrica y química.

Antes de la determinación de la composición granulométrica y química empleamos el método del cono y anillo, figura 2.2 a partir del cual se obtienen dos porciones iguales de muestras empleando una de ellas para el análisis granulométrico y la otra para el análisis químico.



**Figura 2.2** Método del cono y anillo

Este procedimiento se realizó tres veces como muestra la figura 2.3 para una mejor homogeneización del polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.



**Figura 2.3** Esquema de homogeneización y cuarteo empleado.

## **2.5 Determinación de la composición química y granulométrica del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.**

La caracterización del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas se realiza con el objetivo de especificar su uso, teniendo en cuenta que no se conoce una aclimatación alguna en el país con este desecho. A partir este conocimiento se puede decretar y dar algún fin al mismo.

### **2.5.1 Composición química del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.**

#### **Determinación de la composición química.**

Esta se determinará por Fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de marca Philips PW 2404, el cual se muestra en la figura 2.4.

El principio de funcionamiento del (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 se calculan 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 2.4** Equipo de fluorescencia de rayos X, Philips.

### **Aparatos, utensilios y medios de medición.**

- Fluorescencia de Rayos x.
- Equipamiento común de laboratorio.

### **Selección y preparación de la muestra.**

- Se toma una muestra compósito de cada turno de trabajo (24 h).
- Esta muestra compósito se homogeniza y cuartea hasta obtener un espécimen de análisis representativo.
- La muestra cristalina se muele hasta obtener un polvo fino homogéneo.

### **Procedimiento**

1. En estas instalaciones se someten al análisis en el fluorescencia de Rayos x.
2. Las muestras se colocan en el haz dentro de unos tubos capilares de paredes de vidrio fino o celofán. Alternativamente se puede mezclar la muestra con un cemento no cristalino adecuado y pulverizarla dándole una forma adecuada.
3. En este caso la fuente es un tubo de rayos X con filtros adecuados. Sin embargo la muestra pulverizada reemplaza el monocristal en su soporte.
4. En algunos casos el soporte de la muestra puede girar con el objetivo de la aleatoriedad en la orientación de los cristales. El diagrama de difracción se obtiene entonces, mediante un barrido automático, de la misma manera que se obtiene un espectro de emisión o de adsorción.
5. Los instrumentos de este tipo suelen ofrecer la ventaja de presentar una elevada precisión en la medida de la intensidad, reducción automatizada de los datos y generación del informe.

### **2.5.2 Preparación del polvo generado en los hornos de arco eléctrico para determinar la composición granulométrica.**

Para determinar la composición granulométrica del mineral es necesario secarlo logrando buenos resultados en el tamizado.

## **Equipamiento empleado en la investigación**

### **Secado**

El material se sometió al proceso de secado en una estufa a la temperatura de 105–110 °C como se muestra en la figura 2.5.



**Figura 2.5** Estufa de secado.

Se utilizó una balanza analítica para determinar la masa de las muestras obtenidas para la composición granulométrica del polvo.



**Figura 2.6** Balanza analítica.

El comportamiento granulométrico del mineral se determinó usando un juego de tamices y la tamizadora que se muestra en la figura 2.7, con tamaño de abertura +2 mm, +1,6 mm, +1,25 mm, +0,8 mm, +0,4 mm, +0,2 mm, +0,08 mm, +0,063 mm, +0,04 mm.





**Figura 2.7.** Tamizadora y Juego de tamices.

## **2.6 Preparación de los morteros y hormigones.**

Los materiales empleados para las mezclas de morteros y hormigones son los siguientes: el polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas, arena de la cantera Del Rincón, polvo de piedra de la cantera de Las Parras “José Rodríguez”, arena 19-10 de la cantera de Las Parras “José Rodríguez”, cemento Pórtland P-350 y agua.

### **2.6.1 Dosificación de los Morteros.**

Como se observa en la tabla 2.1 para la realización de la presente investigación se realizaron morteros patrones y morteros con sustitución parcial entre el 10 % y el 50 % de cemento Pórtland por el polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

En la investigación se elaboraron un total de 9 morteros de referencia con 100 % de cemento Pórtland y 45 morteros con sustitución parcial del 10 % al 50 % de cemento Pórtland por el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas. El tipo de mortero realizado fue el III debido a que este es el más utilizado en las construcciones.

**Tabla 2.1** Dosificación de los morteros.

Morteros	Polvo de HAE. (%)	Dosificación					Proporción
		Cemento (g) (I)	Arena (g) (II)	Polvo (g) (III)	Agua (ml) (IV)	Polvo de piedra (g) (V)	I : II : V
<b>Morteros patrones</b>	0	220	1124	0	290	692	1 : 4 : 2
<b>Morteros con sustitución</b>	10	198	1124	22	290	692	1 : 4 : 2
	20	176	1124	54	300	692	1 : 4 : 2
	30	154	1124	66	270	692	1 : 4 : 2
	40	132	1124	88	290	692	1 : 4 : 2
	50	110	1124	110	260	692	1 : 4 : 2

### Mezclado

Para la elaboración de la mezcla de los morteros patrones, primeramente se vertió la cantidad establecida de cemento Pórtland en el recipiente, luego se añadió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas como aparecen en la tabla 2.1, el mezclado del agua y cemento se realizó hasta lograr una buena homogenización.

Luego se le agregó la arena sin detener el proceso de mezclado. Después se dejó en reposo durante 30 segundos y se mezcló nuevamente, lo que permitió una buena homogenización de los materiales. De forma análoga se realizó la mezcla de los morteros con sustitución parcial del 10 % al 50 % de cemento Pórtland por el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

### Proceso de moldeado:

El mortero se prepara acorde con la NC 173:2002. Se empleará un molde 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. El molde debe estar limpio y bien cerrado. Las paredes y su base deben engrasarse previamente antes de ser utilizados. Se vierte una porción representativa de la muestra de aproximadamente 300 g de mortero en cada compartimento del molde, para formar una primera capa que permite que a los 30 segundos se expulse el aire atrapado en el material y la humedad suba a la superficie y la segunda capa permite emparejar y engrasar los moldes, después de colocar cada capa, que se compactará en toda su superficie con 25 golpes suaves y homogéneos. Luego se vierte el resto del material y se repite la operación de apisonado, de modo que no afecte la masa del mortero colocado inicialmente ya apisonado. Se eliminan los espacios vacíos que hayan podido quedar en la superficie de los tres compartimentos. Cuando el mortero comience a endurecer, se engrasa el molde con una superficie metálica.

Luego de la compactación de la mezcla en los moldes, estos fueron situados en un local donde se garantizó una buena conservación y pasadas 24 horas fueron desmoldados.

#### **El curado de las probetas:**

Se mantiene en el molde durante 24 h en ambiente húmedo a temperatura de  $(27 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C})$  y más de 90 % de humedad relativa (no sumergidas en agua) o cubiertas con una bolsa de plástico. A continuación: se desmoldan, se marcan y se mantienen en ambiente húmedo hasta la edad de ensayo. El procedimiento se realizó a partir de la norma cubana NC 173:2002.

#### **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 polvo, 6 probetas para la obtención de 10 MPa de resistencia a la compresión, 6 probetas para la obtención de 15 MPa e igual número de probetas para la obtención de 20 MPa, 25 MPa 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 7 y 28 días se le sustituyó el 15 % de cemento P-350 por polvo. Para la elaboración del hormigón el mezclado se realizó mediante una mezcladora eléctrica (figura 2.8).

Primeramente se realizaron las probetas para obtener 10 MPa de resistencia, para ello se vertió la cantidad de árido grueso, arena, cemento y polvo en la mezcladora (figura 2.8), 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 2.2.



**Figura 2.8** Mezcladora.

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 desmolde 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.

Según el procedimiento de la norma NC 221:2002, se preparan las probetas de hormigón, donde se emplearon moldes cilíndricos (figura 2.9) de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto.



**Figura 2.9** Moldes cilíndricos.

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-polvo-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.

**Tabla 2.2.** Dosificaciones de los materiales en la mezcla para los hormigones patrones.

	Unidades	Dosificaciones patrones				
Resistencia a la compresión a los 28 días	MPa	10	15	20	25	30
<b>Cemento P-350</b>	<b>kg</b>	69,73	91,89	112,16	128,38	143,24
<b>Arena</b>	<b>kg</b>	213,51	203,24	213,51	186,49	179,46
<b>Arena 19-10 (mm)</b>	<b>kg</b>	260,81	248,65	237,30	228,11	219,19
<b>Agua</b>	<b>l</b>	67,03	68,38	70,27	71,62	72,97
<b>Relación A/C</b>	<b>-</b>	0,96	0,74	0,63	0,56	0,51
<b>Asentamiento</b>	<b>cm</b>	8 a 9	8 a 9	8 a 9	8 a 9	8 a 9

**Tabla 2.3.** Dosificaciones y % de sustitución de materiales en la mezcla para la confección de los hormigones con sustitución del 15 % de polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

Elementos	Unidad	Dosificaciones con sustitución del 15 % de polvo de los HAE.				
		10	15	20	25	30
<b>Resistencia a la compresión</b>	MPa	10	15	20	25	30
<b>Cemento P-350</b>	kg	59	78	95	109	122
<b>Arena</b>	kg	214	203	194	186	179
<b>Arena 19-10 (mm)</b>	kg	261	249	237	228	219
<b>Agua</b>	l	68	70	72	74	75
<b>Relación A/C</b>	-	1,14	0,90	0,76	0,68	0,62
<b>Polvo de los HAE</b>	kg	10,46	13,78	16,82	19,26	21,49
<b>Asentamiento</b>	cm	8 - 9	8 - 9	8 - 9	8 - 9	8 - 9

## 2.7 Determinación de los ensayos de resistencia a los morteros y hormigones.

Las propiedades mecánicas y de durabilidad son generalmente usadas como referencia para la evaluación de la calidad general de un material de construcción, debido a que en su aplicación final, el material será empleado en función de su capacidad portante y a la resistencia, generalmente correlacionada con otros parámetros, tales como, la porosidad y la permeabilidad. Es importante asegurar que en la sustitución parcial de cemento Pórtland por el material en estudio se obtengan resistencias mecánicas y de durabilidad adecuada para cumplir con los requerimientos de sus prestaciones de servicio.

La determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión de los morteros de referencia y los morteros con sustitución de polvo se realizó en una prensa hidráulica de 10 t (toneladas) como muestra en la figura 2.10. Los valores obtenidos en la prensa hidráulica para los ensayos de resistencia a la flexión y la compresión son expresados en MPa, el equipo cuenta con los aditamentos que se muestran en la figura 2.11, necesarios para dichos ensayos, uno para realizar la flexión y otro para la compresión, cada aditamento se coloca por separado en el equipo para realizar los ensayos.



**Figura 2.10** Prensa Hidráulica.

### **2.7.1 Ensayo de resistencia a la flexión.**

El ensayo de la resistencia a la flexión se cumplió como exige la NC 173:2002. Se realizó con la ayuda de 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 fuera 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. Luego se aplicó la fuerza para su rotura.

### **2.7.2 Ensayo de resistencia a la compresión.**

En el ensayo de resistencia a la compresión se practicó como exige la NC 173:2002. 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 mm de ancho y largo, 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 10x10 cm de la prensa, 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 (Figura 2.11), 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.



**Figura 2.11** Aditamento especial para el ensayo 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.

### **2.7.3 Determinación de la resistencia a la compresión para los hormigones.**

En el ensayo de resistencia a la compresión se cumplió como exige la NC 244:2005. 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 12), 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 2.12.** Prensa hidráulica de 125 t y anillos de aceros para la realización de la compresión.

## **2.8 Conclusiones parciales.**

Después de analizado este capítulo se llegaron a las siguientes conclusiones parciales:

- Se determinaron las características químicas y granulométricas del residuo en estudio así como breve referencia del equipamiento empleado.

Las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicadas en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación reúnen los requisitos para la obtención de resultados adecuados a las normas cubanas e internacionales.

### **3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

En el capítulo se muestran la evaluación de los resultados de la caracterización y ensayos realizados al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas, se exponen íntegramente los resultados de los ensayos hechos a las mezclas conformadas para morteros y hormigones con cemento P – 350; utilizando la arena de la Cantera del Rincón, el polvo de piedra y la arena 19-10 de las cantera de José Rodríguez en Las Tunas. 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 de la composición química y granulométrica realizada al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.**

##### **3.1.2 Caracterización de la Composición química.**

A continuación se muestra el resultado de composición química promedio de las tres muestras obtenida al realizarle análisis químico al polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas, el mismo está formado por una mezcla de óxidos dónde predominan los óxidos de hierro, calcio, manganeso, silicio, entre otros, reflejados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Composición química promedio del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

Compuesto	Conc. (kg)	Conc. (%)	Compuesto	Conc. (kg)	Conc. (%)
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,3	3,3	<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,4	1,4
<b>MgO</b>	2,7	2,7	<b>CaO</b>	7,3	7,3
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,94	0,94	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	52,5	52,5
<b>SiO<sub>2</sub></b>	5,4	5,4	<b>ZnO</b>	5,6	5,6
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,44	0,44	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,47	0,47
<b>SO<sub>3</sub></b>	2,4	3,2	<b>MnO</b>	9,4	9,4
<b>PbO</b>	2,3	2,3			

### 3.1.2 Caracterización de la composición granulométrica.

Los datos obtenidos en el ensayo granulométrico indican que para utilizar este material no es necesario realizar un tamizado previo que garantice la granulometría para cada mezcla a preparar ya que su tamaño es compatible con la granulometría del cemento P-350 de 90 micrones.

Para añadir el polvo a los morteros y hormigones no se requiere realizar un cribado, facilitando así su uso, con un aprovechamiento al 100 % del material a utilizar, obteniéndose un rendimiento del 100 % respectivamente.

Al someter la muestra del polvo a un análisis granulométrico empleando la siguiente escala de tamices (+2 mm, +1,6 mm, +0,8 mm, +0,4 mm, +0,2 mm, +0,08 mm, +0,063 mm, +0,04 mm), se obtienen los resultados presentados en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Valores reales del peso de cada fracción.

Clases (mm)	Salida			
	(g)	%	Sumaria por más, %	Sumaria por menos, %
<b>+2</b>	1,451	1,451	1,451	100
<b>-2 +1,6</b>	2,551	2,551	4,002	98,549
<b>-1,6 +1,25</b>	<b>3,971</b>	<b>3,971</b>	<b>7,973</b>	<b>95,998</b>
<b>-1,25 +0,8</b>	<b>3,841</b>	<b>3,841</b>	<b>11,814</b>	<b>92,027</b>
<b>-0,8 +0,4</b>	<b>14,351</b>	<b>14,351</b>	<b>26,165</b>	<b>88,186</b>
<b>-0,4 +0,2</b>	<b>60,021</b>	<b>60,021</b>	<b>86,186</b>	<b>73,835</b>
<b>-0,2 +0,08</b>	<b>12,981</b>	<b>12,981</b>	<b>99,167</b>	<b>13,814</b>
<b>-0,08 +0,063</b>	0,511	0,511	99,678	0,833
<b>-0,063 +0,04</b>	0,241	0,241	99,919	0,322
<b>-0,04 +0,00</b>	0,081	0,081	100	0,081
<b>Total</b>	100	100		

### **3.2 Evaluación de los resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros y hormigones.**

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros y hormigones con la sustitución del polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

#### **3.2.1 Resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros de albañilería con cemento P – 350.**

Las mezclas para morteros fueron diseñadas teniendo en cuenta las distintas aplicaciones a que son sometidos, para la investigación se realizaron los morteros de tipo III debido a que son los más utilizados en una amplia gama de trabajos.

**Tabla 3.3** Recomendaciones para morteros.

Lugar de colocación			Rc 28 d.(MPa) (valor mínimo)		Retención de agua (%) Valor mínimo
			Recomendada	Alternativo	
Exterior	Sobre el nivel del terreno	Muro portante	III	IV - V	90
		Muro no portante	I	II - III	
		Antepecho	III	IV - V	
	Bajo el nivel del terreno	Muro de fundición	V	IV > V	90
		Muro de contención			
		Pavimentos, caminos, patios.			
Interior	Muro portante		III	IV - V	90
	Muro no portante		I	II - III	90

Para esto se efectuó un barrido de dosificaciones desde 10 % hasta 50 % y teniendo en cuenta el valor de resistencia a la compresión exigida en las normas, fueron seleccionados los morteros más adecuados en cada caso y se describe para la acción constructiva en que son empleados tabla 3.3.

**Tabla 3.4** Tipos de morteros.

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

Los procedimientos seguidos para la producción de los morteros con la sustitución del 10 % hasta el 50 % del cemento P-350 por el polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas se corresponden con los establecidos en la NC 175:2002, observándose que los valores de resistencia a la compresión que se obtiene son más elevados, lo que permite poder realizar combinaciones de mezclas con la adición de menor cantidad de cemento, permitiendo un ahorro de este material. Las mezclas con este cemento logran proporcionar mayor resistencia a la compresión y por tanto se emplean en trabajos de mayor exigencia. En la tabla 3.5 se aprecia que los valores de resistencia a la compresión de los morteros con

sustitución de cemento por polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas son más elevados que los realizados sin el mismo, aun para las mismas dosificaciones de los materiales.

**Tabla 3.5** Valores de resistencia a la compresión.

Morteros	Sustitución de polvo de los HAE por cemento P-350, %	Resistencia a la compresión, MPa		
		7 días	14 días	28 días
<b>Próbete patrón</b>	<b>0</b>	3,6	4,2	5,2
<b>Próbetas con sustitución</b>	<b>10</b>	3,6	4,3	5,3
	<b>20</b>	3,1	3,6	4,9
	<b>30</b>	1,9	2,6	4,3
	<b>40</b>	1,5	1,9	3,9
	<b>50</b>	1	1,7	3,1

La figura 3.1 muestra la tendencia de la resistencia a la compresión de los morteros con adición de polvo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas y los morteros sin sustitución para los 7 días, 14 días y 28 días como dice la norma, así como la comparación entre los morteros convencionales con los que poseen aditivos desde los 10 % hasta los 50 % de polvos generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas.

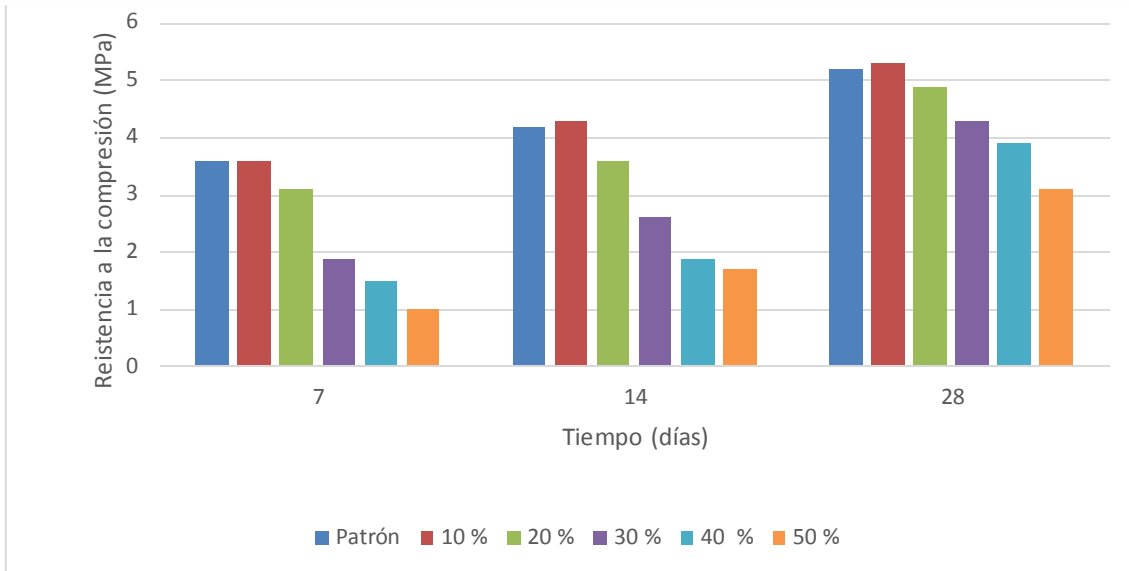


Figura 3.1 Comportamiento de la resistencia a la compresión.

Los resultados de las mezclas de morteros para los 28 días dieron como deducciones que para los morteros con sustitución del 10 % cumplieron con la NC 175:2002 mejorando en un 0,1 MPa y para el caso de las dosificaciones de 20 %, 30 % y 40 % no cumplen con el mortero de tipo III, pero cumple con el parámetro para los de tipo I (2,4 MPa) ya que alcanzaron los valores de 4,9 MPa, 4,3 MPa y 3,9 MPa respectivamente y para el tipo II (3,5 MPa) las dosificaciones del 20 % y 30 % cumplen con la norma.

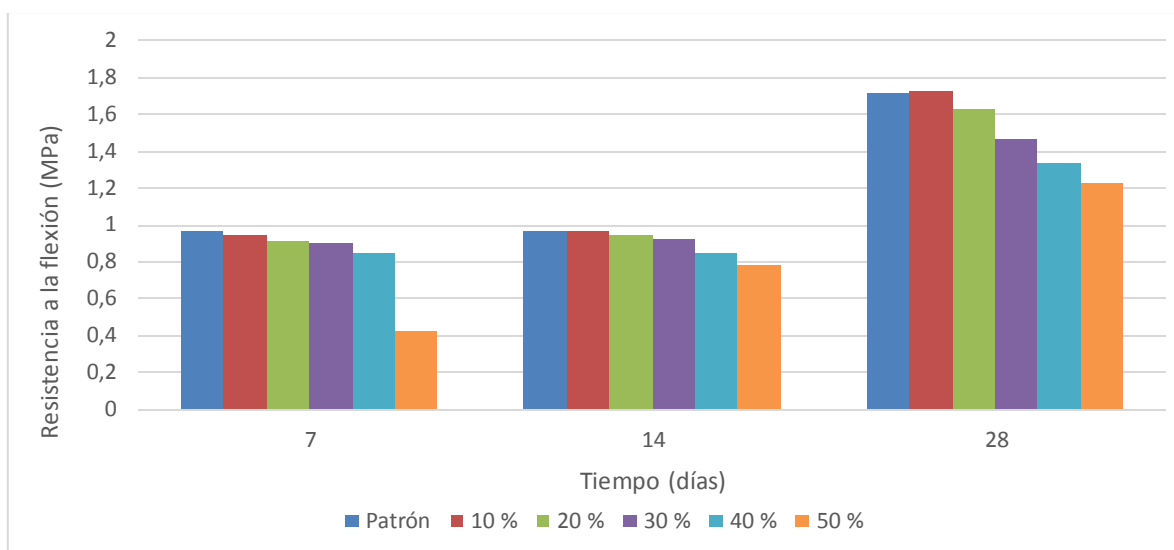
### 3.2.2 Resultados de los ensayos de flexión a las mezclas de morteros.

Los resultados de los ensayos de flexión arrojaron los valores que se expone en la tabla 3.6, como se observa solo para él 10 % se alcanzaron valores aceptables comparados con los que arrojaron los morteros convencionales.

**Tabla 3.6** Resultados de los ensayos de flexión.

Morteros	Sustitución de polvo de los HAE por cemento P-350, %	Resistencia a la compresión, MPa		
Probeta Patrón	0	0,963	0,972	1,72
Probetas con sustitución	10	0,945	0,97	1,725
	20	0,918	0,943	1,634
	30	0,904	0,92	1,462
	40	0,85	0,843	1,341
	50	0,425	0,78	1,232

Más detallado se observa en el figura 3.2 quedando demostrado la tendencia de la flexión para los días 7 días, 14 días y 28 días para las mezclas de morteros.



**Figura 3.2** Resistencia a la flexión de los morteros de referencia y los morteros con 10, 20, 30, 40 y 50 % de polvo de los hornos de arco eléctrico.



Para fundamentar el empleo del polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas como adición en las mezclas de mortero se tiene presente lo expresado en la NC 175:2002, acápite 4.4, que dice:

En la fabricación de morteros de albañilería se pueden utilizar cualquier tipo de agregado siempre que se pueda demostrar que las propiedades del mortero son las descritas en esta norma y que no ejercen efectos perjudiciales sobre los demás componentes. Los aditivos que se utilicen no deben afectar desfavorablemente a la calidad de ejecución de la obra, a la durabilidad y a la resistencia a los agentes atmosféricos.

### **3.2.3.1 Resultados de la resistencia a la compresión de las mezclas de los hormigones.**

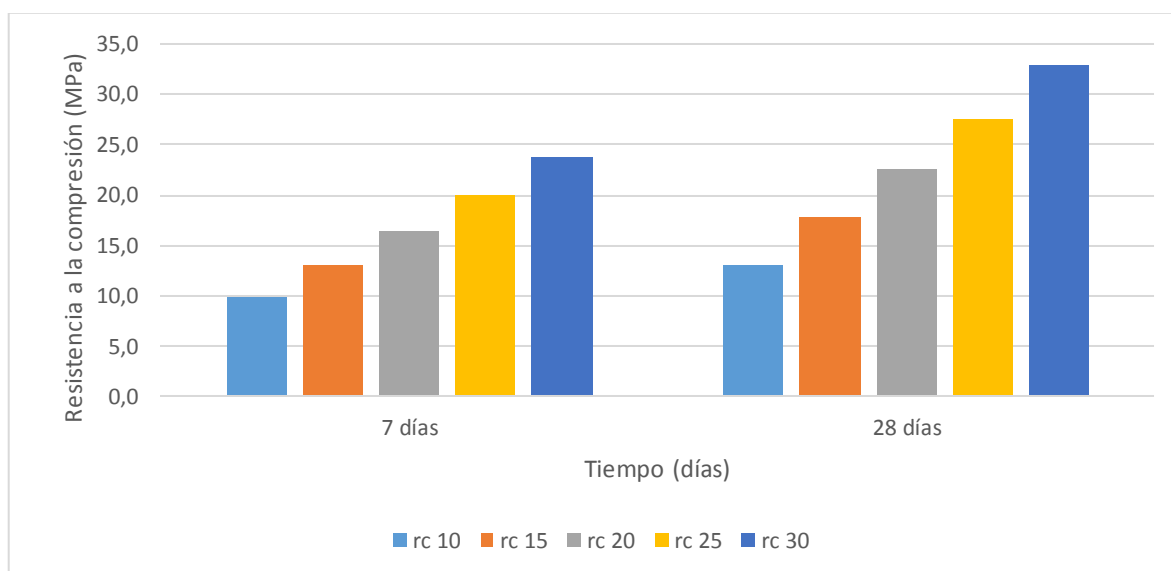
Fueron estudiadas las mezclas realizadas con anterioridad en el laboratorio (sin el uso del material en análisis) como patrones de comparación; partiendo de estos diseños se realizaron otras mezclas sustituyendo 15 % de polvos generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas. Para comparar los resultados la tabla 3.7 muestra estos datos.

Las mezclas con sustitución del 15 % dieron sobresalientes resultados debido a que sobrepasaron los resultados de los hormigones patrones para los 28 días por lo que se puede sustituir el 15 % de cemento por el polvos generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas en las mezclas ahorrando así cemento en un total de 39 kg a 80 kg de este según el tipo de hormigón que se quiera constituir.

**Tabla 3.7** Resultados de la resistencia a la compresión de los hormigones.

Hormigones		Resultados de la resistencia a la compresión (MPa)				
Hormigones patrones 28 días (MPa)		10	15	20	25	30
Hormigones con sustitución del 15 % de polvo de los HAE.	7 días	9,8	13,2	16,5	20,1	23,8
	28 días	13	17,8	22,6	27,5	33

En las tablas 2.2 y 2.3 se refleja un mayor consumo de agua cuando se adiciona los polvos generados en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas en la mezcla; pero el rendimiento del cemento es mayor para las mezclas con estos polvos que para las mezclas sin él. La resistencia a la compresión es más elevada en estas mezclas, con valores de hasta 3 MPa superiores a los de la mezcla sin el mismo. La siguiente figura muestra el comportamiento de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión para 7 días y 28 días.



**Figura 3.3** Resistencia a la compresión de los hormigones con 15 % de polvo generado en los hornos de arco eléctrico para 10, 15, 20, 25 y 30 MPa.

Las tablas de dosificaciones de morteros y hormigones son el documento oficial para elaborar la preparación técnica de toda actividad que esté vinculada a la producción de morteros y hormigones, el incumplimiento de estas provocan considerables pérdidas a la economía. Los materiales que deben ser utilizados en el estudio y diseño de las mezclas deben cumplir con los requisitos que establecen las normas vigentes.

Debido que los incumplimientos de los índices de calidad de las materias primas provocan elevados consumos de cemento, lo que afecta a la economía de la empresa y del territorio, la alteración de estos índices es responsabilidad de la entidad que lo utilice. Es importante señalar que debido a la inestabilidad en la calidad de los áridos es obligatorio enviar muestras de todos los materiales al laboratorio antes de elaborar los morteros y hormigones.

El incumplimiento de los requisitos de calidad de los materiales puede provocar:

- Caídas de resistencia de los morteros.
- Dispersión en los resultados de las muestras.
- Sobre consumo de cemento.

### **Impacto medioambiental**

Los óxidos ( $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ ) contaminan el aire y mezclados con agua producen la lluvia Ácida, algunas sustancias como los derivados, clorados, sulfatos y ácidos son corrosivos. El gas  $\text{H}_2\text{S}$  es sumamente toxico y contamina el aire. Los polvos de hornos de arco eléctrico están constituidos por un 3,2 % de dicho compuesto. Además existen otros riesgos ambientales que trae consigo el vertimiento de este residuo en el vertedero de la entidad como son: la lixiviación de metales pesados (Pb, Sb, Cd, Se, etc.) hacia el manto freático, la aspiración de este residuo por personas que laboran cerca del lugar de vertimiento.

### **Valoración económica**

La valoración económica es una herramienta fundamental para la implementación de cualquier proyecto a realizar. Para el caso en que estamos enmarcado, que es el

ahorro de cemento P-350 con ayuda del polvo generado en ACINOX-Las Tunas se realiza la siguiente valoración.

Asumiendo que una vivienda consuma 2 000 kg de cemento para su fabricación y que los precios del cemento en la tiendas están por los 102 CUP, se podría ahorrar 200 kg de cemento con la sustitución del 10 % de cemento por polvo de hornos de arco eléctrico. Al conocer que las bolsas de cemento vienen con un contenido neto de 50 kg se podría ahorrar entonces 408 CUP.

### **3.3 Conclusiones parciales**

Se determinó la composición granulométrica inicial del material con el que se experimentó, donde se comprobó que más del 87 % del polvo generado en los hornos de arco eléctrico está comprendido en la clase de tamaño (-0,8 +0,08). mm. Lo que define su analogía con la del cemento.

Se comprobó durante la determinación de las propiedades físico mecánicas de los morteros y hormigones que con la adición de polvo generado en los hornos de arco eléctrico se obtiene una resistencia máxima a la compresión para los hormigones de 33 MPa y para los morteros de 5,3 MPa. Para el caso de los morteros la resistencia a la flexión alcanzó un valor de 1,725 MPa para la dosificación del 10 % cumpliendo con las normas cubanas.

## CONCLUSIONES

La utilización del polvo generado en los hornos de arco eléctrico como agregado en las mezclas de hormigones y morteros para la construcción es factible, al permitir la sustitución del 15 % de cemento P-350 por  $m^3$  en el caso de los hormigones en los rangos de resistencia a la compresión desde 10 MPa hasta 30 MPa ya que estas logran una resistencia superior a los hormigones convencionales de 13 MPa hasta 33 MPa respectivamente, dando como resultado un ahorro físico de cemento por  $m^3$  de hormigón que oscila desde 39 kg hasta 80 kg para las diferentes resistencias a la compresión evaluadas, ver Tabla 3.7 y en el caso del mortero tipo III, se puede sustituir el 10 % de cemento por  $m^3$ , debido a que este logra un valor superior a los morteros convencionales alcanzando este valores de ahorro de cemento por  $m^3$  de 22 kg, ver Tabla 2.3.

## RECOMENDACIONES

- En próximos estudios caracterizar el polvo generado en los hornos de arco eléctrico desde el punto de vista mineralógico.
- Evaluar en el campo de actuación micro-estructural, la interacción entre las fases de los distintos materiales que conforman las mezclas del mortero y hormigones; además el comportamiento de las variables: resistencia a la compresión durante el envejecimiento, resistencia a la tracción, cambios de longitud (expansión y contracción), succión capilar, comportamiento ante los choques térmicos, permeabilidad y reacción a la acción de los agentes químicos.
- Evaluar 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.
- Se recomienda darle continuidad a este tema de investigación, ya que como se conoce este material a nivel mundial no se emplea como material para la construcción pero el país cuenta con un gran volumen de este desecho.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amaral de Lima, L. Noviembre de 1999. Tesis Doctoral, Hormigones con escorias de hornos eléctricos como áridos: Propiedades, Durabilidad y Comportamiento ambiental. Barcelona, España.
- Alejandro Salazar J. 2005. Experiencia de reciclaje en la producción de materiales de construcción. Quinto Congreso Nacional disposición final de residuos sólidos. ECO- Ingeniería, E.U. 2005. [alsaja@uniweb.net.co](mailto:alsaja@uniweb.net.co).
- Aprile, A. et al., 1999. Reutilización de cenizas de centrales térmicas. Argentina. [www.ingenieroambiental.com.ar](http://www.ingenieroambiental.com.ar) .
- Artiles Álvarez J, 2012. Aplicación de las tobas zeolitizadas cubanas en la fabricación de hormigón premezclado del Cayo Santa María. UBIM ECOT SM, abril 2012, Villa Clara.
- ASTM C 618- 03. Standard specification for Coal fly and raw ore calcined natural pozzolan for use in concrete.
- ASTM C-125. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.
- ASTM C- 618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw ore Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.
- ASTM C- 618-78 (1992). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw ore Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.
- Archivo técnico Laboratorio ENIA, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), Unidad de Investigación para la Construcción, Pinar del Río. Rafael Morales # 242, Sur, Altos, Pinar del Río.

- Berridi Aguirre I, (junio, 2008). Barcelona, España. “Análisis de la influencia de residuales Metalúrgicos como áridos en las propiedades del Hormigón”.
- Certificado de ensayo No. 15/2012. Departamento de Caracterización de Materiales. Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM).
- Certificado de ensayo No.35/2011. Departamento de Caracterización de Materiales. Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM).
- Díaz Carmona A., Carmona González A. y Estrada Núñez A. Informe. “Reconocimiento geológico de los depósitos de ceniza de pirita de la Empresa Sulfometales”. Santa Lucia, Pinar Del Río, noviembre de 2005.
- Díaz Brito N. 2012 et al. “Evaluación de escorias de acería de horno eléctrico para su empleo como material de construcción”. Publicación: Pesquisa y Tecnología, Minerva 6(3):313-320. Sao Paulo, Brasil.
- DCMPT – 008 – 01. Determinación del contenido de Al, Fe, Cr, Ca, Mn, Mg y otros, mediante fusión con Metaborato de Litio por ICP. CIPIMM. La Habana, Cuba.
- Frías Rojas M. et al, “Características de la escoria de Si-Mn y su viabilidad como árido de reciclado en hormigones”. 1er Congreso Nacional de Áridos. Zaragoza, España, 2006.
- Herrerade la Rosa R. y Gayoso Blanco R. 2003. Áridos para Hormigón. Especificaciones y ensayos.
- Hernández Sampieri R. et al. Metodología de la Investigación. Segunda Edición. McGraw Hill, México. 1998.
- Martirena F. et al., 2012. Activación de Arcillas de Bajo Grado para la Producción y Uso de Puzolanas como Sustitutos de Clinker en Sistemas Cementicios Ternarios Clinker – Metakaolin – Carbonato. Universidad



Central "Marta Abreu", Universidad Politécnica de Lausana, Instituto Superior Politécnico "J.A. Echeverría", Cementos Siguaney.

- Mateo Manuel. Los residuales. Su uso ecológico en la Construcción. //or residuos.htm/.
- Mateos de Vicente M. 2001. Escritos e investigaciones de Manuel Mateo de Vicente. [www.manuelmateos.info](http://www.manuelmateos.info) y/o Publicaciones sobre Geotecnia, por M. Mateos ([www.manuelmateos.com](http://www.manuelmateos.com))
- *Mateos de Vicente M*, "Stabilization of two Iowa limestones with fly ash alone", PROCEEDINGS, Iowa Academy of Sciences, Vol. 70, 1963.
- *M. Mateos*, "El problema de las cenizas volantes en el País Vasco", ARTE Y CEMENTO, Pág. 60 y 61, 20 Septiembre 1987.
- *M. Mateos*, "Utilización de las cenizas volantes en la construcción", EDITECO, Pág. 110-11, Junio 1989.
- *M. Mateos*, "Normas ASTM para análisis y evaluación de las cenizas volantes", ARTE Y CEMENTO, Pág. 58 y 59, 20 Septiembre 1987.
- *M. Mateos*, "Estabilización de gravas con cenizas volantes", BOLETIN, Sociedad Española de Mecánica del Suelo, Instituto Torroja, Mayo 1965.
- *M. Mateos*, "Ladrillos de arena y cenizas volantes", BOLETIN, Sociedad Española de Mecánica del Suelo, Instituto Torroja, Mayo 1965.
- *M. Mateos*, "Contribución a la utilización de las cenizas volantes", CIMBRA, Junio 1987.
- *M. Mateos*, "Ladrillos de arena y cenizas volantes", BOLETIN, Sociedad Española de Mecánica del Suelo, Instituto Torroja, Mayo 1965.
- *M. Mateos*, "Ladrillos de arena y cenizas volantes", BOLETIN, Sociedad Española de Mecánica del Suelo, Instituto Torroja, Mayo 1965.

- *M. Mateos*, Sobre "Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e influencia de los aditivos sobre el mismo", CIMBRA, Dic. 1987.
- *M. Mateos*, Sobre "Las presas como complemento de las centrales térmicas", REV. DE OBRAS PUBLICAS, Pág. 839-841, Octubre 1985.
- *M. Mateos*, "Los conocimientos de las cenizas volantes hace 30 años", CIMBRA, Junio 1988.
- *M. Mateos*, Sobre "Empleo de las cenizas volantes en la fabricación de hormigones", REV. DE OBRAS PUBLICAS, Pág. 49-51, Enero 1989.
- *M. Mateos*, Sobre "Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e influencia de los aditivos en el mismo", REVISTA DE OBRAS PUBLICAS, Pág. 111-113, Febrero 1987.
- *M. Mateos*, "El cemento más barato del mundo", QUIMICA HOY, Septiembre 1991.
- *M. Mateos*, "Stabilization of soils with fly ash alone", HIGHWAY RESEARCH RECORD, No. 92, Nat. Academy of Sciences, Washington, DC, 1964.
- Mitrofánov S.I. et al, 1947. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir Moscú. Traducción al español, Editora Mir 1928.
- NC 54 - 395: 1987. Materiales de la Construcción.Áridos, Términos y definiciones.
- NC 54 -396: 1987. Arena sílice normalizada para ensayos de cemento. Especificaciones de calidad. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.

- NC 95: 2001: Cemento Portland. Especificaciones.1 Edición marzo de 2001. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC 95: 2011 (CTN 022). Cemento Portland. Especificaciones. 2 Edición diciembre de 2011. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC 97: 2011 (CTN 022). Cemento de Albañilería. Especificaciones. 2 Edición diciembre de 2011. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC. 120: 2007: Hormigón Hidráulico. Especificaciones. 2 Edición, noviembre de 2007. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC 173: 2002. Mortero endurecido. Determinación de le resistencia a flexión y compresión.
- NC 175:2002 Mortero de Albañilería. Especificaciones. 1 Edición marzo de 2002. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC 186 2002. Arena. Peso específico y absorción de agua, método de ensayo.1 Edición, Abril de 2002. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC: 251: 2005, Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.1 Edición, mayo de 2005. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.
- NC 526: 2007. Cemento hidráulico. Términos y definiciones.1 Edición noviembre de 2007. Oficina Nacional de normalización; calle E No. 261 Vedado, C. de la Habana, Cuba.

- O' Reilly V. Dr. Ing; Métodos para la dosificación del concreto. Folleto 1 edición 1997, MICONST, Cuba.
- Ovchinnikov V.et al., Informe sobre los resultados de la exploración detallada del yacimiento pirito-polimetálico Santa Lucia de la provincia Pinar del Río, realizado durante los años 1982 – 1987 con el cálculo de reservas por variante hasta el 30/3/87. Tomo I, Empresa Geominera Pinar del Río, Santa Lucia, 1992.
- Plan de Manejo ambiental. Departamento Técnico. Empresa Geominera Pinar del Río, Cuba.
- Pereira, septiembre 30 de 2005. Eco- Ingeniería E.U. Quinto Congreso Nacional Disposición Final de Residuales Sólidos Experiencia de Reciclaje en la Producción de Materiales de Construcción.
- Salvat M. et al., 1972. Enciclopedia Salvat de las Ciencias. Tomo 15. Industria. Salvat, S.A. de Ediciones, Pamplona, 1968. Impreso, en Barcelona, España 1972.
- Soto Izquierdo O., Soto Izquierdo I. y Díaz Brito N. 2011. Evaluación de escoria de acería de horno eléctrico para su empleo como material de construcción. Pesquisa e Tecnologia, Minerva, 6(3): 313-320. e-mails: [orieta@sc.usp.br](mailto:orieta@sc.usp.br) ; [indara@sc.usp.br](mailto:indara@sc.usp.br); [nediaz@civil.cujae.edu.cu](mailto:nediaz@civil.cujae.edu.cu).
- Villarino Otero, A. Materiales de Construcción; Asignatura Ingeniería civil, Escuela Politécnica Superior de Ávila Ingeniería Técnica de Topografía.