

# **Empleo de polvo de humo de hornos de arco eléctrico como material alternativo de construcción**

**Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

**Yoandris Hernández Guevara**

**Moa**

**2017**



**Ministerio de la Educación Superior**  
**Instituto Superior Minero-Metalúrgico**  
**Facultad: Metalurgia – Electromecánica**

# **Empleo de polvo de humo de hornos de arco eléctrico como material alternativo de construcción**

**Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

Autor: Yoandris Hernández Guevara

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

Tutor: MSc. Roger Samuel Almenares Reyes

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

Consultante: MSc. Gualberto Rosales Martín

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

**Moa**

**2017**

## PENSAMIENTO



El futuro de nuestra Patria, tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamientos, porque precisamente es lo que estamos sembrando: oportunidades a la inteligencia.

*Fidel Castro Ruz*

## **DEDICATORIA**

A mi madre a mi hermano y a los amigos y compañeros que se quedaran siempre en mi memoria y a mí como ser intelectual que me superé en la vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mí y a todo aquel que ha estado de una forma u otra pendiente de mi bienestar social e intelectual.

Gracias a todos.

## **RESUMEN**

En la Empresa ACINOX Las Tunas se generan grandes volúmenes de polvo de humo durante el proceso de fusión en los Hornos de Arco Eléctrico, sin una utilización actual definida. El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento físico-mecánico de morteros y bloques huecos de hormigón con la sustitución parcial de cemento P-35 por polvo de humo generado por los HAE de ACINOX-Las Tunas, como una alternativa para minimizar la carga contaminante. Para ello se determinó la composición química y granulométrica de la materia prima, y las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de morteros y bloques donde se sustituye parcialmente el cemento por polvo. En los ensayos realizados a los morteros se sustituyó 10, 20, 30, 40 y 50 % de cemento por el polvo, y para el caso de los bloques se sustituyó 8, 12, 16 %. Como resultado se presenta que los morteros tipo III, obtenidos con sustitución de un 10 % de cemento, y los bloques huecos de hormigón con sustitución entre 8 y 16 %, cumple con los valores establecidos en las normas. El empleo de este residuo sólido constituye un significativo aporte a la disminución de la carga contaminante al medio ambiente que produce su deposición.

**Palabras Claves:** Polvos, hornos de arco eléctrico, sustitución, mezclas, propiedades.

## **SUMMARY**

ACINOX-Las Tunas Company generates large volumes of smoke dust during melting process in the Electric Arc Furnaces, without a defined current use. The objective of this work is to evaluate the physical-mechanical behavior of mortars and concrete hollow blocks with the partial substitution of P-35 cement by smoke dust generated by the AEF of ACINOX-Las Tunas, as an alternative to minimize the pollution. For this purpose, the chemical and granulometric composition of the raw material and the physic-mechanical properties of the mortar and block mixtures where the cement was partially replaced by powder were determined. In the tests performed on the mortars 10, 20, 30, 40 and 50 % of cement were replaced by the dust, and in the case of the blocks 8, 12, 16% was substituted. As a result, type III mortars, obtained with the substitution of 10 % of cement, and the concrete hollow blocks with substitution between 8 and 16 %, are shown to comply with the values established in the standards. The use of this solid residue constitutes a significant contribution to the reduction of the pollutant load to the environment that produces its deposition.

**Key words:** Dusts, ovens of electric arc, substitution, mixtures, properties.

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....</b>	<b>5</b>
1.1 Introducción .....	5
1.2 Adiciones minerales en morteros y hormigones .....	5
1.4 Polvo de humo de hornos de arco eléctrico .....	7
1.5 Principales usos del polvo de humo de HAE .....	10
1.6 Empleo de polvo de humo de HAE en la construcción .....	14
Conclusiones parciales .....	15
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 Diseño de la Investigación .....	16
2.2 Diseño de experimento .....	16
2.3 Características de la planta generadora del residuo en estudio .....	16
2.4 Toma y selección de la muestra del polvo .....	17
2.4.1 Tratamiento de la muestra .....	18
2.5 Determinación de la composición química y granulométrica de la muestra de polvo .....	19
2.5.1 Composición química.....	19
2.5.2 Composición granulométrica .....	21
2.6 Formulación y preparación de los morteros y bloques huecos de hormigón	22
2.6.1 Dosificación de los morteros.....	23
2.6.2 Preparación de los morteros.....	23
2.6.3 Dosificación de los bloques huecos de hormigón .....	25
2.6.4 Preparación de las mezclas y confección de bloques huecos de hormigón. Especificaciones .....	25
2.6.5 Curado de los bloques huecos de hormigón.....	26
2.6.6 Determinación de las dimensiones .....	27
2.6.7 Preparación de las muestras para el ensayo del bloque hueco de hormigón.....	27
2.7 Ensayos de resistencia a los morteros y hormigones .....	30

2.7.1 Ensayo de resistencia a la flexión.....	31
2.7.2 Ensayo de resistencia a la compresión.....	31
2.8 Ensayo de resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón ....	32
2.8.1 Determinación de la resistencia a la compresión .....	33
2.9 Determinación de la absorción de agua .....	35
Conclusiones parciales .....	36
<b>3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 Resultados de la composición química y granulométrica realizada al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas .....	37
3.1.1 Caracterización de la composición química.....	37
3.1.2 Composición granulométrica .....	38
3.2 Evaluación de los resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros y hormigones .....	39
3.2.1 Resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros .....	39
3.2.2 Resultados de resistencia a la flexión de los morteros .....	42
3.2.3 Resultados de la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón.....	43
3.2.4 Resultados de la desviación típica de la muestra de ensayo.....	45
3.2.5 Resultados de las dimensiones, el área y la absorción .....	46
3.3 Impacto medioambiental .....	46
Conclusiones parciales .....	48
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>49</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>

## INTRODUCCIÓN

Las necesidades del mundo actual exigen al hombre, la búsqueda del perfeccionamiento de las tecnologías de producción de metales y aleaciones que en su mayoría son procesos continuos que no cesan de contaminar y destruir la naturaleza. El hombre trabaja por minimizar las afectaciones al medio ambiente, por lo que se necesita disponer de condiciones favorables para ejercer los cambios a los que estamos expuestos, sin correr el mayor riesgo posible de agotar o destruir la vida de sus habitantes (Madías, 2009).

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 (Olano Estevez, 2009).

La premisa de la que se debe partir es de que suele ser más rentable, a largo plazo, evitar la generación del impacto medioambiental en su fuente a través de la mejora tecnológica económicamente disponible que trata de corregir o minimizarlo después de generarlo, es preferible rediseñar productos, procesos y la estructura funcional de la organización que implantar filtros de gases, depuradoras de aguas residuales o descontaminar suelos (Rosales Martín, 2016).

ACINOX Las Tunas, tiene una amplia trayectoria de investigaciones realizadas y trabajos encaminados a mejorar o contrarrestar los impactos de su proceso productivo, que de hecho es bastante agresivo, para el medio ambiente, ya que en este proceso son empleados recursos naturales que de una

forma u otra contaminan el medio ambiente. Deficiencias con la recogida de basuras en las instalaciones, dificultades con el tratamiento de los desechos de la producción, emanaciones constantes de polvos y gases tóxicos a la atmósfera, derrames y salideros en los tanques de combustible, alto nivel de ruido, las altas temperaturas en sus talleres o el agotamiento de los propios recursos naturales incorporados al producto, son algunos de los problemas más evidentes que presenta actualmente la entidad (Rosales Martín, 2016).

Los Hornos de Arco Eléctricos (HAE) generan gases de escape que al salir arrastran numerosas partículas finas, denominadas usualmente polvo de humos de horno de arco eléctrico, están compuestas por elementos provenientes de los que conforman la carga, encontrándose en los porcentajes mayores el hierro, calcio, silicio, manganeso, cinc y metales pesados como el plomo y el cadmio, que se evaporan durante el proceso (Madías, 2009 ; De La Torre et al., 2013 ; Delvasto et al., 2011).

La presencia de los metales implica que el polvo se clasifique como residuo peligroso. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), en 1980 lo incluyó en esta categoría y diversos países y regiones se sumaron posteriormente. La cantidad de partículas generada varía de planta a planta, pero se estima un mínimo de 15 kg/t y un máximo de 25 kg/t. Internacionalmente el polvo generado en los hornos de arco eléctrico, que se arrojaba a la atmósfera a través de las chimeneas perjudicando el ambiente laboral y su entorno, ahora se recupera en las casas de humos. Una vez recuperados surge la interrogante de qué hacer con ellos. Inicialmente, los polvos se depositaron en terrenos propios o en depósitos de terceros (Madías, 2009).

Las recientes visitas y auditorías realizadas por el CITMA a la empresa ACINOX-Las Tunas, 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 esta empresa (Gómez Mariño, 2014).

Aun cuando se realiza un esfuerzo para dar solución a esta problemática existente (Dutra et al., 2006 ; Leclerc et al., 2002), 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. Una de las más prometedoras es su utilización como sustituyente parcial del cemento P-35 en morteros y hormigones (bloques), la cual se propone en este trabajo para 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 (Gómez Mariño, 2014). El trabajo realizado investigó la posibilidad de aprovechar este polvo generado por los HAE de ACINOX - Las Tunas, como sustituyente parcial del cemento en mezclas de morteros y hormigones (bloques). Su utilización significaría la disminución del consumo de cemento, el ahorro de materiales naturales y por consiguiente la eliminación de un contaminante al medio ambiente.

La necesidad de buscar vías de utilización del polvo de humo generado por los HAE en la empresa ACINOX - Las Tunas constituye la **situación problemática** de la presente investigación, a partir de la cual se formula como **problema de la investigación**: insuficiente conocimiento de la utilización del polvo de humo generado por los HAE como sustituto parcial del cemento P-35 en las mezclas de morteros y bloques huecos de hormigón, limita su valorización en la industria de materiales de la construcción.

**El objeto a investigar es:** mezclas de morteros y bloques huecos de hormigón con sustitución parcial de cemento P-35 por polvo de humo generado por los HAE de ACINOX-Las Tunas.

**Objetivo general:** Evaluar el comportamiento físico-mecánico de morteros y bloques huecos de hormigón con la sustitución parcial de cemento P-35 por polvo

de humo generado por los HAE de ACINOX-Las Tunas, como una alternativa para minimizar la carga contaminante.

Para dar solución a este problema fue planteada la siguiente **hipótesis**: Si el polvo generado por los HAE se emplean como sustituto parcial en las mezclas de morteros y bloques huecos de hormigón, y estas cumplen con las propiedades físico-mecánicas establecidas en las normas, entonces se podría utilizar como material alternativo para la industria de la construcción.

**Objetivos específicos son:**

1. Caracterizar el polvo generado en el Hornos de Arco Eléctrico de ACINOX-Las Tunas desde el punto de vista granulométrico y químico.
2. Determinar las propiedades mecánicas de las mezclas de morteros y bloques de hormigón con la sustitución parcial de cemento P-35 por polvo de humo generado por los HAE.

**El campo de acción:** está constituido por el comportamiento físico-mecánico de las mezclas de morteros y bloques de hormigón con la sustitución parcial de cemento por el polvo generado.

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

## **1.1 Introducción**

En este capítulo se exponen los resultados de la búsqueda de información actualizada con respecto a la producción de aceros por vía eléctrica y la emisión de polvo de humo de HAE al medio ambiente. Se presenta además, información sobre el empleo del polvo de humo generado durante la fusión como necesidad ambiental e industrial para la sociedad.

En especial en la literatura recoge importantes resultados en el campo de la caracterización y la aplicación de métodos para el aprovechamiento del polvo de humo generado en HAE en ACINOX-Las Tunas.

Se establece el estado del arte en el tratamiento del polvo de humo generado en HAE y las perspectivas para su utilización en la industria de la construcción. La búsqueda de alternativas que posibiliten la utilización de este desecho, considerado un residuo de la producción de aceros, mediante procesos tecnológicos sin afectar la calidad de los productos, debe significar un reto a los investigadores.

## **1.2 Adiciones minerales en morteros y hormigones**

Los productos que sustituyen parcialmente al cemento deben diferenciarse de los aditivos químicos usados en el concreto (por ejemplo los aditivos plastificantes, superplastificantes, inclusores de aire, entre otros), así como también de los sustitutos de los agregados, como por ejemplo el vidrio molido (Argos, 2015).

Se llaman aditivos a aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón, mortero o pasta, antes o durante el amasado, producen una modificación deseada de alguna de sus características, de sus propiedades

habituales o de su comportamiento en dicho hormigón, mortero o pasta, en estado fresco y/o endurecido (ANON., 2017).

Los aditivos podrán utilizarse siempre que se compruebe, mediante los oportunos ensayos, que la sustancia agregada en las proporciones y condiciones previstas produce el efecto deseado sin perturbar excesivamente las restantes características del hormigón ni representar peligro para la durabilidad del hormigón ni para la corrosión de las armaduras. El uso de los aditivos se justifica por razones técnicas y económicas ya que determinadas características del hormigón fresco y endurecido no pueden lograrse sin el uso de estos.

Las adiciones, a diferencia de lo que ocurre con los aditivos, se agregan al hormigón en cantidades importantes, por lo que es necesario tenerlas en cuenta al determinar la composición volumétrica del hormigón. Podrán utilizarse adiciones, para modificar favorablemente alguna de las propiedades del hormigón o conseguir ciertas características especiales tales como aislamiento térmico o acústico y determinada coloración (Argos, 2015).

Tienen el carácter de adiciones, las escorias, cenizas volantes, ciertos polvos minerales, materiales inertes, como los colorantes, materiales no minerales, de naturaleza orgánica, tales como ciertas resinas sintéticas.

Al utilizar adiciones con el hormigón no deben sobrepasarse valores límites ya que, en caso contrario, pueden resultar perjudicadas la durabilidad del hormigón o la protección contra la corrosión, sin que esta influencia desfavorable pueda ser detectada mediante ensayos previos de corta duración.

Cuando minerales finamente divididos se adicionan a hormigones deficientes en finos, la trabajabilidad mejora, reduce la razón y cantidad de exudación, y aumenta la resistencia. Cuando se adicionan polvos minerales a hormigón con finos suficientes, en particular a hormigones ricos en cemento Portland, en general disminuye la trabajabilidad para un contenido dado de agua; por lo tanto, aumenta la necesidad de agua y la contracción por secado y disminuye la resistencia.

La adición de polvos minerales finos disminuirá la eficiencia de los agentes inclusores de aire y, en general, tiene que aumentarse la proporción de ese agente inclusor cuando se adicionan estos polvos a la mezcla.

Las adiciones influirán en la reducción de cemento y el desarrollo del calor de hidratación. Las adiciones tienen la propiedad de reaccionar químicamente en presencia de agua, pueden aumentar la resistencia a largo plazo y, generalmente, aumentan la resistencia a la reacción álcali-agregado.

Para la elaboración del hormigón se han buscado alternativas que permitan utilizar menor cantidad de cemento garantizando las mismas propiedades de la mezcla, lo cual ha llevado a encontrar adiciones minerales derivadas de otros procesos industriales, que actúan como material cementante suplementario. Estos procesos logran ahorros de energía importante, eliminan productos de desecho de procesos contaminantes, pueden mejorar la calidad del concreto terminado y reducen su costo de elaboración (Argos, 2015).

En el caso de utilización de adiciones para la elaboración de elementos prefabricados de hormigón debe existir un control estricto debido a que la resistencia inicial es muy importante en estos procesos, debido a esto en esa industria no se utilizan habitualmente altos porcentajes de material cementante suplementario.

#### **1.4 Polvo de humo de hornos de arco eléctrico**

Más del 45% del acero total es producido a través de hornos de arco eléctrico (Salihoglu et al., 2007), aunque depende si son aceros comunes o especiales. Los aceros inoxidable se fabrican en horno eléctrico. Sin embargo, el reciclado de polvos de acero inoxidable no es tan frecuente como el de acero común.

En el proceso de aceración por arco eléctrico se generan gases, tanto en la atmósfera interna de los hornos, así como en el baño de acero líquido, por las reacciones de carburación, y dentro de la escoria buscando el espumado de las

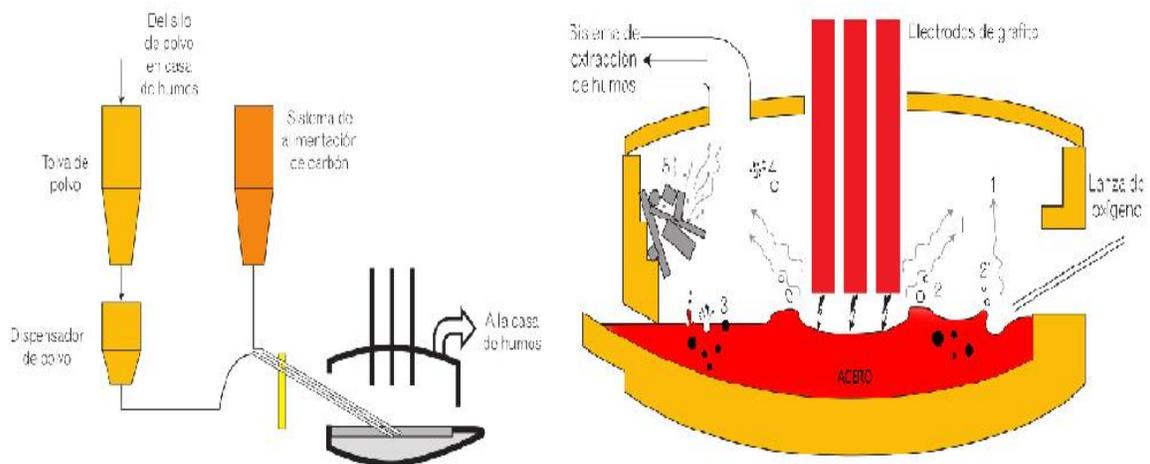
mismas (Figura 1.1). Estos gases son succionados por un sistema de aspiración para ser purificados y al escapar de los hornos llevan consigo partículas sólidas que son colectadas (Quaranta, Lalla, 2010 ; Guézennec et al., 2005). Estas partículas, denominadas usualmente polvo de humo de HAE, están compuestas por elementos provenientes de la carga (chatarra, cal, carbón y ferroaleaciones) y materiales de refractarios, 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 (Madías, 2009 ; Machado et al., 2006). Este polvo es considerado un residuo sólido peligroso por las legislaciones medioambientales de los principales países y recibe el tratamiento correcto para su disposición o reciclaje en función de que en su composición se puede encontrar mayormente hierro y zinc con menores porcentajes de plomo y cadmio entre otros (Quaranta, Lalla, 2010 ; Madías, 2009 ; Nyirenda, 1991 ; Sofilic et al., 2005 ; Orescanin et al., 2007 ; Machado Martins et al., 2008 ; Da Silva Machado et al., 2006 ; Shawabkeh, 2010 ; Delvasto et al., 2011). Desde el punto de vista de la estructura cristalina, el polvo está constituido por espinelas del tipo  $(Fe, Zn, Mn)OFe_2O_3$ , de fases vítreas ricas en  $FeO_x$ ,  $SiO_2$  y  $CaO$  y de zincita ( $ZnO$ ) (Sofilic et al., 2005 ; Madías, 2009). La EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, lo hizo así en 1980 y diversos países y regiones se sumaron posteriormente (Madías, 2009).

La cantidad y el tipo de las partículas emitidas por los hornos eléctricos dependen de muchas variables. Se estima que el 75 % de todas las emisiones se produce en la primera mitad del proceso. La generación mundial de polvos de acería de horno de arco eléctrico se estima del orden de 3,7 millones de toneladas por año y se espera que aumente su producción (Barreneche et al., 2016, 2013).

Existen diversos tipos de tratamientos y sistemas de gestión para el polvo de acería, tanto si se pretende disminuir su toxicidad hasta hacer viable su depósito como si se quiere reciclar o reutilizar. Las principales vías de gestión para este tipo de residuos son la valorización de óxido de cinc a través del proceso Waelz, los procesos de solidificación/estabilización o sólo estabilización como pretratamiento

al vertido (Fernández-Olmo et al., 2007 ; Pereira et al., 2007 ; Fernández Pereira et al., 2001 ; Pereira et al., 2009) o la valorización en cementos (Salihoglu et al., 2007 ; de Vargas et al., 2006 ; Abo-El-Enein et al., 2013), cerámicos (Kavouras et al., 2007) y materiales poliméricos para retención térmica y acústica (Barreneche et al., 2013). Por otro lado, a pesar del alto nivel de óxidos de hierro que contienen, el reciclado directo en alto horno o en horno de arco eléctrico prácticamente no se lleva a cabo debido a potenciales problemas operacionales (Hansmann et al., 2002).

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 (Madías, 2009 ; Tápanes Robau et al., 2001).



**Figura 1.1** Producción de acero y generación de polvo

Debido a sus propiedades físicas y químicas estos polvos originan problemas ecológicos si son vertidos al ambiente:

- En contacto con el  $H_2O$  generan lixiviados que contienen productos alcalinos, cloruros, fosfatos.
- El 60 % de las partículas de estos polvos es menor de 50 micras.

Por estas razones las legislaciones ambientales exigen que en caso de ser vertidos tengan que inertizarse y depositarse en lugares especiales. Esta condición unida a que cada vez se hace más difícil el control de zonas adecuadas de vertido, hace que los costos de los vertederos para estos materiales residuales sean cada día más importantes. Esto justifica que las actividades de recuperación de los metales contenidos en el polvo de acería alcancen progresivamente mayor interés económico (Tápanes Robau et al., 2001).

Existen diversas tecnologías capaces de recuperar los metales presentes en el polvo de acería como la lixiviaciones ácidas o amoniacaes (Dutra et al., 2006 ; Leclerc et al., 2002), horno de plasma (Ranitović et al., 2014), proceso de convertidor (Madías, 2009 ; Jensen, Wolf, 1997) y proceso Waelz (Ruetten, 2006 ; Morcali et al., 2012 ; García-Carcedo et al., 1998).

### **1.5 Principales usos del polvo de humo de HAE**

En las empresas aceristas, a pesar de haber un predominio de la deposición del polvo sin tratamiento en terrenos preparados a ese efecto, se están dando pasos importantes en el reciclado del polvo.

Una forma de reutilización de estos polvos es el reciclado en hornos eléctricos de arco. Este proceso se ha realizado mediante la inyección neumática directa del polvo sobre el acero líquido o haciendo previamente una peletización en frío (Drissen et al., 2002 ; de Araújo, Schalch, 2014 ; Delvasto et al., 2011). En el mundo el polvo de las acerías de horno de arco eléctrico también es utilizado para la producción de pelet (Tápanes Robau et al., 2001). Se prepara una briqueta autorreductora con la que se alimenta un horno de inducción con canal, que contiene arrabio y escoria líquidos (Southwick, 2008).

A pesar del efecto ecológico y económico en términos de reducción de la cantidad de polvo, existe un inconveniente del reciclado del polvo en hornos de arco eléctrico debido al incremento de los niveles de Zn, Pb, Cr y otros elementos nocivos para el acero que se elabora.

En el proceso de elaboración de acero, el cinc y el plomo contenidos en la chatarra, en su mayoría se volatilizan; sólo una pequeña parte pasa al metal y a la escoria (Endemann et al., 2006) y estos son emanados en forma de polvo. Los productores de cinc requieren materias primas con un contenido mayor al 18 % de cinc. En general, los polvos de horno eléctrico tienen un contenido menor. Existe la posibilidad de enriquecer el polvo en cinc reciclándolo en el horno o sometándolo a procesos pirometalúrgicos que lo enriquezcan (Madías, 2009 ; De La Torre et al., 2013). El proceso dominante es el horno rotativo Waelz (Chabot, James, 2000). El proceso Waelz se define como la volatilización de metales no ferrosos como Zn, Pb, Cd, a partir de una mezcla de óxidos sólidos, por medio de la reducción con coquecillo en un horno rotativo, sin generación de escoria líquida (Ruetten, 2006).

Si bien en el período reciente han existido, por el alto costo del mineral de hierro, varios desarrollos destinados a recuperar para la siderurgia las unidades de hierro presentes en el polvo de horno eléctrico, el único que ha alcanzado y mantenido la escala industrial para los aceros al carbono es el proceso PRIMUS (Hansmann et al., 2002). Los polvos provenientes de hornos eléctricos que producen aceros inoxidables también son reciclados con el objetivo de recuperar el cromo y el níquel (Madías, 2009).

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 hornos eléctricos. 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 (Madías, 2009 ; Shawabkeh, 2010 ; Dutra et al., 2006 ; Chabot, James, 2000 ; Fernández-Olmo et al., 2007 ; Lutandula, Kashala, 2013).

Las emisiones de polvo de arco eléctrico se catalogan en emisiones primarias y secundarias. Las emisiones primarias son desarrolladas dentro del horno durante las etapas de fusión y afino. El volumen del gas de escape que se origina durante el proceso así como su temperatura y principales contaminantes dependen de (de Araújo, Schalch, 2014 ; Madías, 2009):

- La naturaleza del material de carga.
- La velocidad de fusión.
- El procedimiento de afino.
- El método de extracción de humos.

La inyección de oxígeno durante la fusión y el afino, genera gran cantidad de humos, conteniendo FeO y gases combustibles. Dependiendo de la cantidad de oxígeno usada el caudal de gases de escape puede ser de hasta un 50 % más que el caudal durante la fusión convencional. Las emisiones secundarias se producen durante el vaciado (Tapping) y la carga del horno.

**Tabla 1.1** Alternativas actuales para el manejo de los polvos de hornos de arco eléctrico (Madías, 2009)

<b>Alternativa</b>	<b>Variante</b>
<b>Depósito</b>	Sin tratamiento
	Con tratamiento de insolubilización de metales pesados
<b>Reciclado</b>	En el mismo horno eléctrico de arco
	Para la obtención de óxido de cinc
	Para la obtención de arrabio y óxido de cinc

El aumento de la producción de acero por la vía de HAE, 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 HAE seguirán creciendo, más allá de la coyuntura actual (Madías, 2009). 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 (Madías, 2009 ; Ye et al., 2004 ; Hansmann et al., 2002 ; Chabot, James, 2000)

	<b>Región</b>	<b>1991</b>	<b>1996</b>	<b>2001</b>
<b>Generación de polvo (x 1000 t/año)</b>	Europa Occidental	530	600	670
	América del Norte	520	675	780
	Japón	450	495	520
	Resto del mundo	580	660	720
	Total	2080	2420	2690
<b>Polvos tratados para producir cinc ( x 1000 t/año)</b>	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
<b>Porcentaje de polvo tratado</b>	43	53	60	-
<b>Contenido promedio de cinc ( % )</b>	15	18	20	-
<b>Capacidad de tratamiento ( x 1000 t/año)</b>	1.17	1.13	1.07	-
<b>Cinc recuperado del polvo ( x 1000 t/año)</b>	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
<b>Cinc perdido ( x 1000 t/año)</b>	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 (Madías, 2009).

### **1.6 Empleo de polvo de humo de HAE en la construcción**

Se han reportado investigaciones sobre la incorporación de polvo de acería eléctrica como sustituto de arcilla mineral en la industria cerámica para construcciones civiles (Quaranta, Lalla, 2010 ; Quaranta et al., 2009 ; Kavouras et al., 2007). Los referidos estudios han confirmado la factibilidad de la reutilización de este tipo de desecho siderúrgico como materia prima en la producción de tejas cerámicas. Se pudo observar que tanto las propiedades físicas necesarias para su uso en servicio, como la resistencia mecánica, la porosidad abierta y la variación volumétrica están dentro de los valores normalmente requeridos. En lo que respecta a las propiedades químicas y medioambientales, los productos cumplen con los requerimientos legales y su uso no representa un riesgo.

Estudios realizados en Cuba, han mostrado la posibilidad de utilización del polvo de humo de horno de arco eléctrico acumulado en los depósitos de residuos de acería eléctrica para la producción de hormigones asfálticos (Tápanes Robau et al., 2001). También ha sido estudiado para ser empleados en la producción de adiciones para cemento (Salihoglu et al., 2007 ; de Vargas et al., 2006),

hormigones (bloques), tejas, lavaderos, mosaicos, viguetas, entre otros productos como pigmento según la proporción añadida (Rodríguez, 2016).

La acumulación de polvo en la acería alentó a estudiar la posibilidad de utilizar el polvo de humo en la producción de morteros y bloques de hormigón con sustituciones parciales de cemento P-35 por el polvo para la industria de la construcción. Lo que persigue con este trabajo es 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.

### **Conclusiones parciales**

- El difícil control de zonas adecuadas de vertido, hace que los costos de los vertederos para estos materiales residuales sean cada día más importantes. Las investigaciones están centradas en la posibilidad de darle uso a este desecho que contamina el medio ambiente. Esto justifica que las actividades de recuperación de los polvos de acería alcancen progresivamente mayor interés económico.
- Existen diversas tecnologías capaces de recuperar los metales presentes en el polvo de acería como la lixiviación ácida o amoniacal, horno de plasma, proceso de convertidor y proceso Waelz.
- Los resultados de los estudios sobre las formas de gestión de polvo de acería en función de reciclaje ha sido la valorización del óxido de cinc, incorporación en matrices cerámicas y estabilización/solidificación para posterior vertido.
- La incorporación de polvo de acería eléctrica como sustituto parcial de cemento ha sido estudiada a nivel de laboratorio, dejando una base para la posible aplicación en morteros y bloques huecos de hormigón.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

En el capítulo se analizarán detalladamente los principales materiales y métodos utilizados en el desarrollo de la investigación.

El polvo de humo generado en los hornos de arco eléctrico (HAE) de la empresa de Aceros Inoxidables (ACINOX) de Las Tunas y su empleo en la industria de la construcción como agregado en las mezclas de morteros y hormigones.

### **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 en morteros y bloques elaborados con dicho material, específicamente la resistencia a la flexión y la compresión.

### **2.2 Diseño de experimento**

El presente será desarrollado según el método tradicional de experimentación. El mismo consiste en realizar experimentos en los cuáles 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 se analizará solamente la influencia la presencia del polvo de humo en la resistencia mecánica de los morteros y bloques huecos de hormigón tipo II. Con una sustitución parcial del 10, 20, 30, 40 y 50 % de cemento Portland (P-35) por el polvo recuperado de los HAE en morteros y 8, 12 y 16 % en bloques huecos de hormigón.

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

La planta ACINOX Las Tunas está ubicada en una de las zonas industriales más importantes del país, a 4 km del centro de la ciudad. 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 cuál desde los últimos 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 del polvo**

La muestra se tomó de modo puntual en la descarga del transportador sinfín de la planta depuradora de gases, cortando 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, permitiendo así la formación de una muestra compósito. La figura 2.1 presenta la instalación descrita.

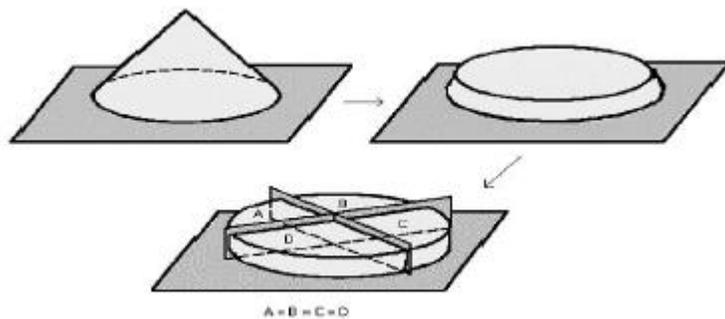


**Figura 2.1.** Planta depuradora de gases

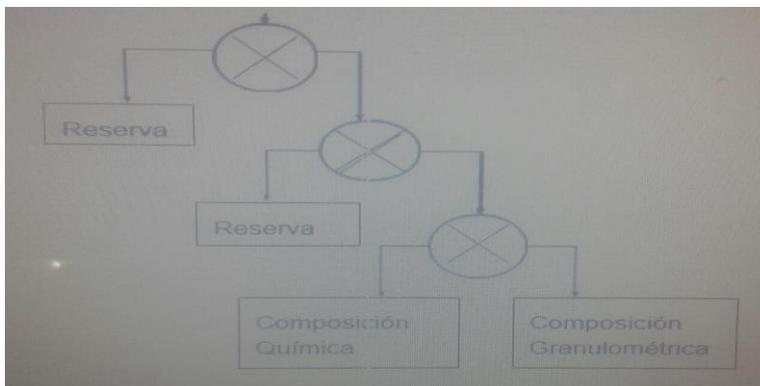
### **Selección de la muestra**

Se tomaron 5 kg de muestras cada día. El proceso de selección se efectuó en siete días consecutivos en el horario comprendido entre las siete y nueve de la

noche correspondiente al horario pico y planta parada. Cada una de las muestras fue sometida a un proceso de homogenización y cuarteo por el método de cono y el anillo (Figura 2.2). Este procedimiento se realizó tres veces como describe la Figura 2.3 para una mejor homogenización. A partir de este método se obtuvo cuatro porciones similares. De ella se empleó una para el análisis granulométrico y el análisis químico. Otra parte fue empleada para los ensayos físico–mecánicos y la muestra restante fue almacena como reserva.



**Figura 2.2** Método del cono y anillo



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

### 2.4.1 Tratamiento de la muestra

El polvo generado en los HAE presenta una granulometría de 2 mm lo que permite aplicar el análisis en cribas de laboratorio por vía seca. Las rejillas de las cribas se extienden dentro de un aro cilíndrico de 200 mm de diámetro y 50 mm de alto. El

borde inferior tiene un diámetro 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.

## **2.5 Determinación de la composición química y granulométrica de la muestra de polvo**

### **2.5.1 Composición química**

La composición química fue determinada 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 de la 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.

### **Preparación de la muestra**

La muestra seleccionada fue molida hasta obtener un polvo fino homogéneo.

### **Procedimiento**

- En estas instalaciones se someten al análisis en el equipo de fluorescencia de Rayos x.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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 Composición granulométrica**

Para determinar la composición granulométrica del polvo fue necesario secar la muestra primeramente, lo cual permite buenos resultados en el tamizado. El proceso de secado se realizó en una estufa a la temperatura de 110 °C como se muestra en la figura 2.5. Se utilizó una balanza analítica para determinar la masa de las muestras obtenidas para la composición granulométrica del polvo.

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 +2mm, +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 2.5** Estufa de secado



**Figura 2.6** Balanza analítica.



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

## **2.6 Formulación y preparación de los morteros y bloques huecos de hormigón**

Los materiales empleados para las mezclas de morteros y bloques de 10 son los siguientes:

- El polvo generado en los HAE de ACINOX-Las Tunas
- Arena de la cantera El Rincón
- Polvo de piedra de la cantera de Las Parras “José Rodríguez”

- Arena -10+5 de la cantera de Las Parras “José Rodríguez”
- Cemento Portland P-35
- 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 por el polvo de aceria. En la investigación se elaboraron un total de 9 morteros de referencia con 100 % de Portland y 45 morteros con sustitución parcial 10, 20, 30, 40 y 50 % de P-35 por el polvo. 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

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

### 2.6.2 Preparación de los morteros

Para la elaboración de la mezcla de los morteros patrones, primeramente, se vertió la cantidad establecida de cemento 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 un buen mezclado de los materiales. De forma análoga se realizó la misma operación para los morteros con sustitución parcial 10, 20, 30, 40 y 50 % de cemento por el polvo.

El mortero se preparó acorde con la NC 173:2010. Se empleó un molde de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada ensayo, lo que genera tres probetas para la prueba de flexión y seis para la 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 enrasar 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 enrasa 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.

Para el curado de las probetas se mantuvieron en el molde durante 24 h en ambiente húmedo a temperatura de  $(2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 27\text{ }^{\circ}\text{C})$  y más de 90 % de humedad relativa (no sumergidas en agua) o cubiertas con una bolsa de plástico. A continuación, se desmoldaron, se marcaron y se mantuvo sumergido en agua

hasta la edad de ensayo. El procedimiento se realizó a partir de la norma cubana NC 173:2010.

### 2.6.3 Dosificación de los bloques huecos de hormigón

Como se observa en la tabla 2.2 para la realización de la presente investigación se realizaron hormigones patrones y con sustitución parcial entre el 16, 12 y 8% de cemento por el polvo generado por los HAE.

**Tabla 2.2** Dosificaciones de materiales en la mezcla para la confección de los bloques huecos de hormigón con sustitución de 8, 12 y 16 %.

	<b>Bloques</b>	<b>Polvo de HAE (kg)</b>	<b>Cemento P-35 (kg)</b>	<b>Arena (kg)</b>	<b>Grava (kg) Fracción (-10+5mm)</b>	<b>Agua (mL)</b>
1	Patrones	0	50	110	175	21,6
2	Sustitución de 16 %	8	42	110	175	32,65
3	Sustitución de 12 %	4,5	45,5	110	175	32,65
4	Sustitución de 8 %	1,5	48,5	110	175	32,65

### 2.6.4 Preparación de las mezclas y confección de bloques huecos de hormigón. Especificaciones

La elaboración de los bloques huecos de hormigón se efectuó según la norma cubana NC 247: 2010.

De acuerdo a las dosificaciones señaladas en el acápite anterior, los bloques fueron ensayados a las edades correspondientes a los 7, 14, 21 y 28 días. Para

cada edad de ensayo fueron tomados 10 bloques de cada dosificación, los cuales fueron valorados posteriormente.

Para la elaboración del hormigón el mezclado se realizó de forma manual. Primeramente, se realizaron los hormigones correspondientes al 16 % de sustitución de cemento por polvo, para ello se vertió la cantidad de árido grueso y arena en una superficie plana para garantizar la homogeneidad, luego se vertió cemento y polvo de humo a la mezcla para su homogenización, se mezcló y luego se vertió el agua previamente medida con una probeta graduada en correspondencia con la cantidad a utilizar en cada una de las mezclas.

Los moldes fueron colocados a la intemperie, en una superficie plana y horizontal, firme y exenta de vibraciones u otros movimientos. Estos fueron previamente engrasados en su interior para facilitar el desmolde. La mezcla confeccionada se vertió en los moldes y se sometieron a tres impactos para una mejor compactación del material.

La relación agua-cemento-polvo-arena-grava(-10 +5 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.

### **2.6.5 Curado de los bloques huecos de hormigón**

La muestra para ensayo se conservó a temperatura ambiente, bajo techo y en superficie plana sobre piso de hormigón. Se tuvo cuidado de no golpear ni dejar caer los bloques que constituyen la muestra de ensayo. La tabla 2.3 presenta la cantidad de bloques a ensayar mediante resistencia a la compresión y absorción de agua.

Cada bloque a ensayar se identificará con pintura o creyón en sus caras

laterales, indicándose lo siguiente:

- Fecha de producción (día, mes);
- Número del lote;
- Número consecutivo de cada unidad de la muestra;
- Número de la línea de producción.

Los bloques que constituyen la muestra deben cumplir los siguientes requisitos:

- No presentarán grietas visibles en las caras ni en los nervios;
- Presentarán sus aristas vivas;
- No presentarán descorchados;
- Tendrán sus caras aparentemente paralelas;
- No le faltarán esquinas.

**Tabla 2.3** Bloques huecos de hormigón a ensayar a los 7, 14, 21 y 28 días

Ensayo	Resistencia media a la compresión	Absorción	Muestra adicional	Total
Unidades a ensayar	6	3	1	10

### **2.6.6 Determinación de las dimensiones**

Este método se establece para determinar las dimensiones de fabricación de los bloques. Se efectúa la medición de cada uno de los bloques que constituyen la muestra y se determina el promedio de cada una de sus dimensiones.

### **2.6.7 Preparación de las muestras para el ensayo del bloque hueco de hormigón**

Las mediciones se efectuarán siguiendo el plan establecido en la Tabla 2.4

**Tabla 2.4** Plan establecido por la norma cubana NC 247 2010 para bloques de 10

<b>Dimensiones</b>	<b>Porcentaje de medición</b>
<b>Longitud</b>	3 mediciones en la cabeza
<b>Ancho</b>	mediciones en 3 puntos por la cara superior y 3 puntos por la cara inferior
<b>Altura</b>	6 mediciones en 3 puntos de cada cara lateral

- Se eliminan las irregularidades o exceso de materiales en las caras de los bloques; para ello se utilizará el hacha de albañil y la lima de grano grueso.
- Se coloca una capa de pasta sobre la superficie de carga y apoyo de los bloques con el fin de nivelar estas, para ello se utiliza la meseta nivelada. Si la superficie de la meseta es de madera esta se cubrirá con un vidrio de espesor mínimo 6 mm, se evitará la adherencia entre las capas de nivelación y la meseta aplicando una capa de aceite desmoldante.
- La capa de nivelación de la superficie de carga y apoyo puede estar constituida por un mortero de cemento gris P-350 y yeso con una proporción de 4:1 (4 partes de cemento con una parte de yeso) o de arena sílice con una proporción de 1:1 (una parte de cemento y una parte de arena sílice), se adiciona agua hasta que adquiera una consistencia pastosa capaz de asentar el bloque y no disgregarse bajo su peso. Ambas mezclas pueden prepararse en seco mezclándose por un espacio de tiempo que este entre los 3 minutos y 5 minutos, añadiéndole posteriormente el agua en cantidad suficiente para preparar el recapado de uno o más bloques, la resistencia a compresión de estos morteros será superior a la especificada para los bloques.
- Para la aplicación de la capa de nivelación, se verterá el mortero preparado sobre la superficie engrasada y se esparcirá con la cuchara de albañil formando una capa uniforme, rápidamente se coloca el bloque sobre esta capa comprobándose su perpendicularidad con la base por

medio de un nivel de burbuja en posición vertical acomodándolo con golpes ligeros con el mango de la cuchara de albañil hasta que quede bien asentado el bloque, retirándose el material sobrante por los lados una vez rematados estos con un movimiento de la espátula entrante hacia arriba.

- Al notarse el endurecimiento de la mezcla antes de las dos horas de colocado el recape, se producirá un leve movimiento sobre el plano horizontal al bloque para evitar su adherencia a la meseta, después se levanta retirándose de la misma y se coloca de forma vertical evitando dañar la capa de nivelación en las esquinas. Se limpia la meseta y se repetirá el mismo proceso para aplicar la segunda capa de nivelación sobre la otra cara del bloque, se comprobará el paralelismo y la verticalidad de las caras por medio del nivel de burbujas.
- Se observará que las capas de nivelación de los bloques no se dañen en la manipulación, se esperará entre 24 horas y 72 horas para efectuar el ensayo.
- Si la capa de nivelación se daña o se pierde parte de la sección de la misma se retirará totalmente colocándose una capa nueva.
- Para efectuar los estudios cada bloque a ensayar se colocará suavemente sobre el plato inferior del aparato de ensayos de compresión sin deslizarlo por este y sobre un área previamente determinada con un centro geométrico conocido que coincide con el eje de carga de la máquina. Antes de colocar el bloque en la cara identificada se marcará un eje central para facilitar el alineamiento del equipo con el mismo o en su defecto se marcará previamente el plato inferior de la máquina.
- Al poner en contacto la cara superior del bloque con el plato superior de la máquina se hará suavemente sin que se produzcan impactos al bloque y que se garantice un buen contacto entre ambas superficies.
- En el momento en que la superficie de la cara superior de la prensa y el bloque tengan contacto se comienza a aplicar una carga a velocidad

constante de 5 kN/s hasta determinar el esfuerzo máximo hasta la rotura

## 2.7 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 porosidad y permeabilidad. Es importante asegurar que en la sustitución parcial de cemento 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 2.8. Los valores obtenidos en la prensa hidráulica para las pruebas de resistencia son expresados en MPa, el equipo cuenta con los aditamentos que se muestran en la figura 2.9, 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 las prácticas.



**Figura 2.8** Prensa Hidráulica.

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

El ensayo de la resistencia a la flexión se cumplió como exige la norma cubana NC 173:2010. 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. Unos 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**

El ensayo de resistencia a la compresión se practicó como exige la NC 173:2010. Cada probeta se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales de la misma, para ello se utilizaron dos placas de acero de forma cuadrada, de dureza no menor de 60 HRC, de 1,040 mm lado, 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 2.9), 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 2.9** Aditamento especial para el ensayo de compresión

## **2.8 Ensayo de resistencia a la compresión en bloques huecos de hormigón**

El ensayo de resistencia a la compresión se cumplió como exige la norma cubana NC 247: 2010. Cada bloque se sometió a un esfuerzo sobre las dos caras laterales del mismo, para ello el bloque fue recapado con cemento (P-35) en una meseta plana y a nivel para lograr que toda la superficie del bloque de forma vertical obtuviese una buena resistencia a la compresión, apoyándose así las platinas de manera uniforme y lo más horizontal posible para aplicar la fuerza.

El bloque se colocó entre los platos de 50 x 50 cm en la prensa que aparece en la (figura 2.10), 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 el bloque, permitiendo transmitir la carga de la máquina sobre las superficies del bloque sometido al esfuerzo.



**Figura 2.10.** Prensa hidráulica de 125 (t) toneladas para la medición de la resistencia a la compresión

### **2.8.1 Determinación de la resistencia a la compresión**

Este método se establece para determinar el valor de la resistencia media a la compresión de los bloques. Cada unidad es sometida a una carga en el sentido longitudinal de los huecos hasta la rotura determinándose la resistencia a la compresión promedio.

#### **Equipos, utensilios y medios de medición**

- Máquina para ensayo a la compresión con capacidad mínima de 1500 kN
- Hacha de albañil o lima de grano grueso
- Masetas niveladas con superficie pulida (terrazo, mármol, madera o metálica)
- Nivel de burbuja
- Espátula
- Cemento P-35
- Bandeja metálica
- Yeso rápido, lento o arena sílice
- Aceite desmoldante

La desviación típica (SR') de la muestra de ensayo se calcula por la expresión siguiente:

$$SR' = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(R'i - R'm)^2}{n}}$$

Donde:

SR' valor de la desviación típica (MPa)

R'm resistencia a la compresión media (MPa)

R'i resistencia a la compresión de cada bloque (MPa)

n tamaño de la muestra de ensayo

La dimensión promedio (X) y su desviación típica se calculan de la siguiente manera:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{n} \quad Sx = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Xi - X)^2}{n}}$$

Donde:

X dimensión promedio de la muestra (mm)

Xi dimensión de cada bloque (mm)

Sx desviación típica de las dimensiones de la muestra

n tamaño de la muestra (número de bloques que constituyen la muestra).

La resistencia a la compresión de cada bloque (R'i) se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$R'i = Fj / aj$$

Donde:

R'i resistencia a la compresión de cada bloque (MPa)

Fj carga de rotura

aj área de la sección bruta del bloque

La resistencia a la compresión media (R'm) se determina por:

$$R'm = \frac{\sum_{i=1}^n R'i}{n}$$

Donde:

R'm resistencia a la compresión media (MPa)

R'i resistencia a la compresión de cada bloque (MPa)

n tamaño de la muestra de ensayo

## 2.9 Determinación de la absorción de agua

Este método se establece para determinar la capacidad de los bloques para absorber una determinada cantidad de agua.

$$A_i = \frac{M_{hi} - M_{si}}{M_{si}} \times 100$$

Donde:

A<sub>i</sub> absorción de la muestra (%)

M<sub>hi</sub> masa húmeda de cada unidad de la muestra (kg)

M<sub>si</sub> masa seca de cada unidad de la muestra (kg)

### Fundamento del método

Los bloques o una sección de estos se sumergen en agua para determinar el contenido de esta por diferencia de masa expresada en porcentaje.

### Aparatos, utensilios y medios de medición

- Balanza técnica de 50 kg como mínimo y valor de división de 1 g.
- Estufa con capacidad mínima de temperatura de 150 °C y regulación automática.
- Estanque, bandeja o cubeta adecuada para que las muestras queden totalmente sumergidas en agua.
- Paños para secar.
- Parrilla metálica.
- Hacha de albañil.

La absorción promedio (A<sub>m</sub>) se calcula por la siguiente fórmula

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

Donde:

$A_i$  absorción de cada unidad de la muestra de ensayo (%)

$A_m$  absorción promedio (%)

$n$  número de bloques de la muestra de ensayo

### **Conclusiones parciales**

De acuerdo a lo analizado anteriormente en el capítulo se arribó a las siguientes conclusiones:

- Se determinaron de las características químicas y granulométricas del residuo en estudio.
- Se realizó una breve caracterización del equipamiento empleado para la práctica de los ensayos de flexión y compresión de los morteros y hormigones (bloques).
- Se establecieron las ecuaciones necesarias para los cálculos de compresión, desviación típica y obtención de la fuerza realizada, teniendo en cuenta que las técnicas analíticas y experimentales que fueron aplicadas en los materiales y mezclas preparadas para el desarrollo de la investigación se rigen estrictamente con las normativas cubanas.

### 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se evalúan los resultados de la caracterización y ensayos realizados al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX- Las Tunas, así mismo los elaborados con las mezclas de morteros y hormigones (bloques) con la sustitución parcial del cemento P-35 por polvo de humos recolectado. Las pruebas realizadas con las sustituciones fueron comparadas con el patrón y así mismo con las normas establecidas y vigentes este año.

#### 3.1 Resultados de la composición química y granulométrica realizada al polvo generado por los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas

##### 3.1.1 Caracterización de la composición química

A continuación, se muestra el resultado de composición química promedio de las tres muestras obtenidas al realizarle análisis químico del polvo de humo, el mismo está formado por una mezcla de óxidos donde predominan los óxidos de hierro, calcio, manganeso y silicio. Los resultados se presentan 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	Contenido (%)
Na <sub>2</sub> O	3,3
MgO	2,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,94
SiO <sub>2</sub>	5,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,44
SO <sub>3</sub>	3,2
K <sub>2</sub> O	1,4
CaO	7,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52,5
ZnO	5,6

Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47
MnO	9,4

### 3.1.2 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-35 de 90 µm.

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** Composición granulométrica de la muestra de polvo

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

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

Resultados de los ensayos realizados a las mezclas con la sustitución del polvo generado en los HAE.

#### **3.2.1 Resultados de los ensayos realizados a las mezclas de morteros**

Fueron diseñadas teniendo en cuenta las distintas aplicaciones a que son sometidos (tabla 3.3), para la investigación se realizaron los morteros de tipo III debido a que son los más utilizados en una amplia gama de trabajos. Las

dosificaciones empleadas y teniendo en cuenta el valor de resistencia a la compresión exigida en las normas (tabla 3.4), fueron seleccionados los morteros más adecuados en cada caso y se describe para la acción constructiva en que son empleados.

**Tabla 3.3** Recomendaciones para morteros

Lugar de colección			Rc 28 d. (MPa) (valor mínimo)		Resistencia de agua (%) (Valor mínimo)
			Recomendada	Alternativo	
<b>Exterior</b>	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			
		Pavimento, camino, patio			
<b>Interior</b>	Muro portante		III	IV - V	90
	Muro no portante		I	II - III	90

**Tabla 3.4** Tipos de morteros

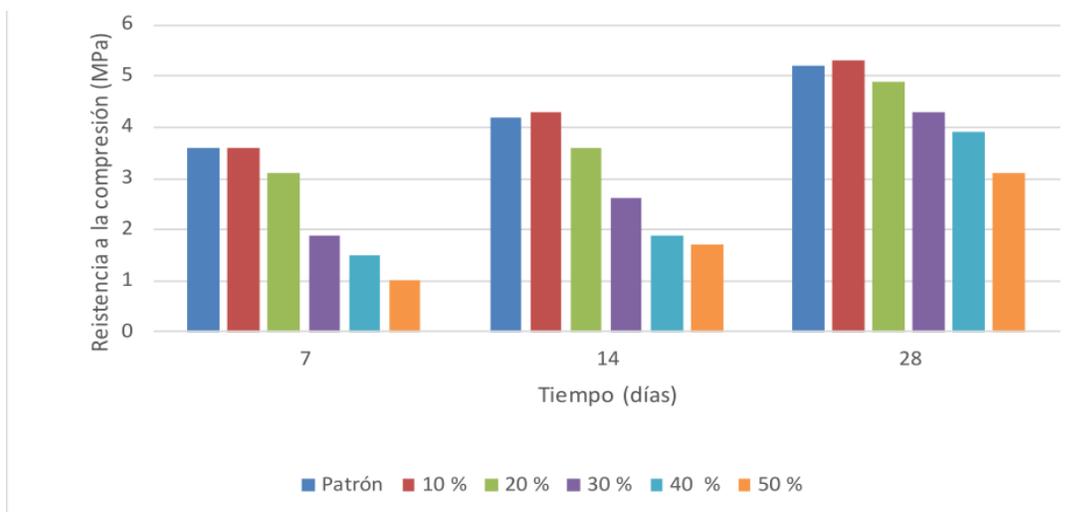
Tipo de mortero	Resistencia a la compresión a los 28 días, (MPa)
I	2,4
II	3,5
III	5,2

Los morteros con la sustitución de 10, 20, 30, 40 y 50 % del cemento por el polvo de humo se corresponden con lo establecido en la NC 175:2010. Las mezclas 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 de los morteros con sustitución parcial de cemento por el polvo generado son superiores a los realizados sin el mismo.

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

Morteros	Sustitución de polvo de humo de los HAE por cemento P-35	Resistencia a la compresión, (MPa)		
		7 días	14 días	28 días
<b>Probeta patrón</b>	0	3,6	4,2	5,2
<b>Probeta con sustitución</b>	10	3,6	4,3	5,3
	20	3,1	3,6	4,9
	30	1,9	2,6	4,3
	40	1,5	1,9	3,9
	50	1	1,7	3,1

La tendencia de la resistencia a la compresión de los morteros con adición de polvo y los morteros sin sustitución (patrón) a los 7, 14 y 28 días, se presentan en la figura 3.1.



**Figura 3.1** Comportamiento de la resistencia a la compresión

Los resistencia de los morteros a los 28 días arrojan que los morteros con sustitución del 10 % cumplen con la NC 175:2010 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 de 20 y 30 % cumplieron con la norma.

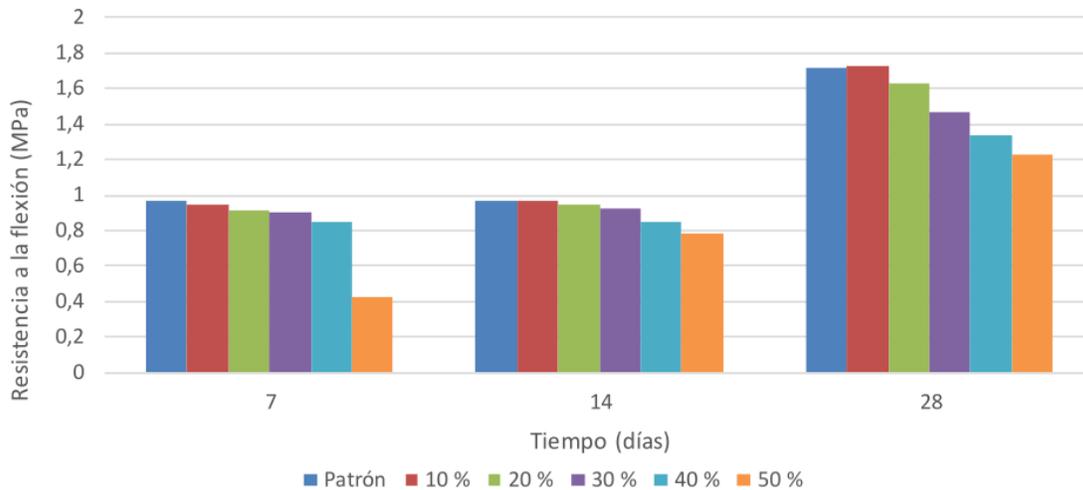
### 3.2.2 Resultados de resistencia a la flexión de los morteros

Los resultados de los ensayos arrojaron los valores que se presentan en la tabla 3.6, como se observa solo para el 10 % se alcanzaron valores aceptables comparados con morteros convencionales. En la figura 3.2 se observa la tendencia de la resistencia a la flexión de los morteros a los 7, 14 y 28 días.

Para fundamentar el empleo del polvo generado por los HAE como sustitución en las mezclas de mortero se tiene presente lo expresado en la NC 175:2010, la cual plantea que 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. Las adiciones que se utilicen no deben afectar desfavorablemente la calidad de ejecución de la obra, la durabilidad y a la resistencia a los agentes atmosféricos.

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

<b>Morteros</b>	<b>Sustitución de polvo de humo de los HAE por cemento P-35</b>	<b>Resistencia a la flexión, (MPa)</b>		
<b>Probeta patrón</b>	0	0,963	0,972	1,720
<b>Probeta con sustitución</b>	10	0,945	0,970	1,725
	20	0,918	0,943	1,634
	30	0,904	0,920	1,462
	40	0,850	0,843	1,341
	50	0,425	0,780	1,232



**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 HAE

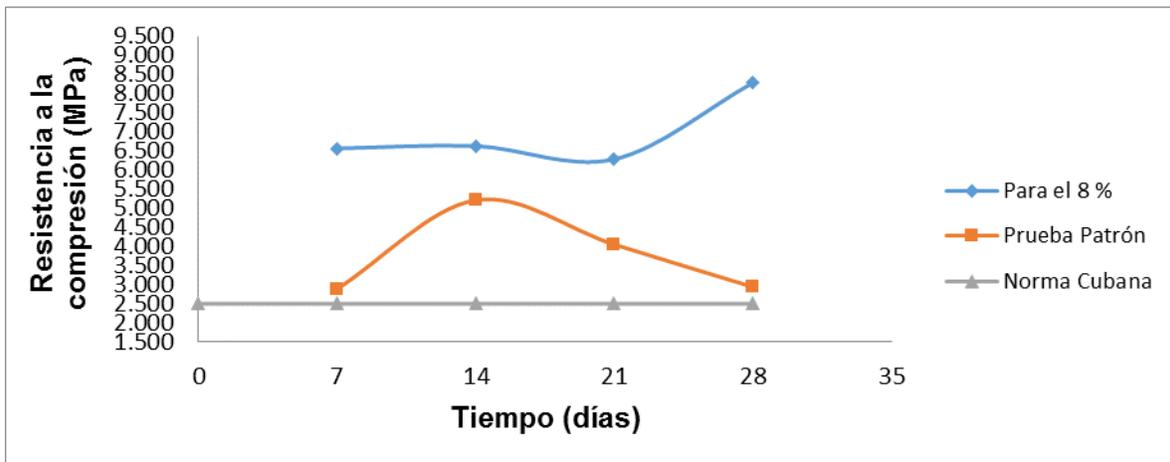
### 3.2.3 Resultados de la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón

En trabajos anteriores (Gómez Mariño, 2014) se reportan dosificaciones empleadas en este trabajo, pero en ese caso se realiza a nivel de laboratorio. Partiendo de estos diseños se realizaron otras mezclas sustituyendo el 8, 12 y 16 % de cemento por los polvos generados en los HAE en la producción de bloques huecos. Los resultados se muestran en la tabla 3.7. Las sustituciones de 8,12 y 16 % de P-35 por el polvo arrojaron valores superiores que las establecidas en las normas cubanas y los bloques de referencia, ahorrando así porcentajes significativos de P-35 y dándole solución a un desecho medio ambiental.

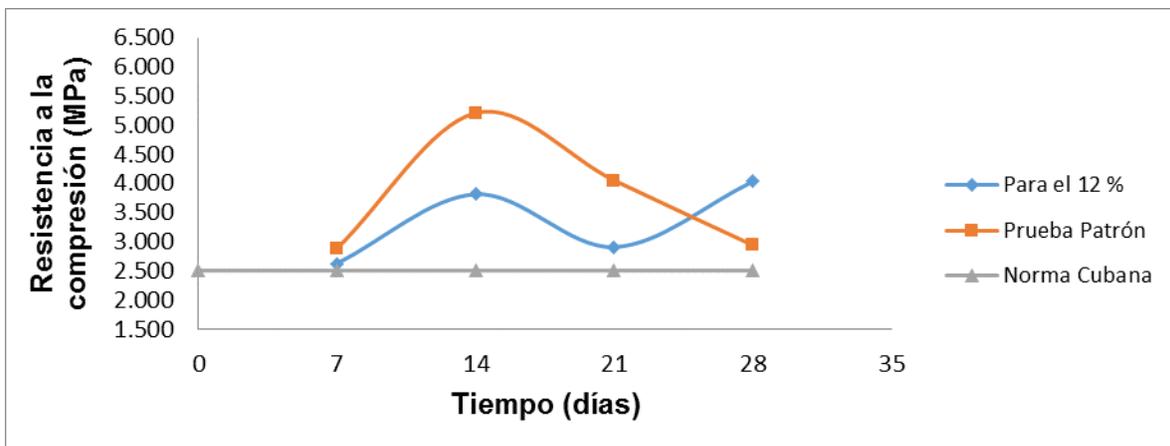
El rendimiento de los bloques huecos de hormigón es superior para las mezclas con sustitución parcial del polvo que para un 100 % de cemento. Se obtienen valores máximos de 8,28 MPa para la sustitución de 8 %. En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los resultados de cada porcentaje de sustitución de polvo comparado con las normas cubanas y el patrón de referencia.

**Tabla 3.7** Resultados de la resistencia a la compresión de los bloques huecos de hormigón

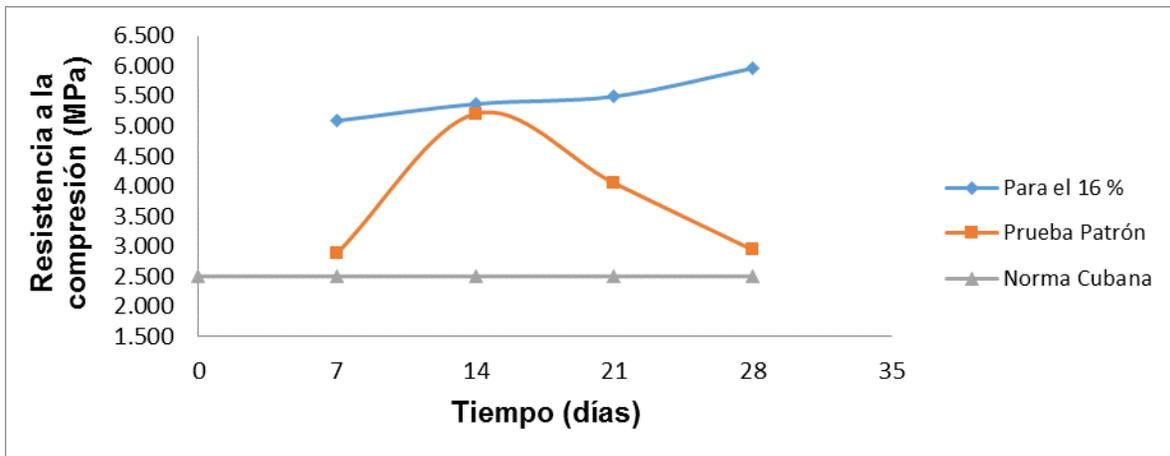
Determinación de la resistencia a la compresión media									
N <sup>ro.</sup>	Sust. De cemento	Tiempo de ruptura (días)							
		7		14		21		28	
		Fuerza (kgf/cm <sup>2</sup> )	(MPa)						
1	0	1150	2,886	2075	5,208	1612	4,048	1175	2,938
2	8	2625	6,563	2650	6,625	2512	6,281	3312	8,281
3	12	1050	2,625	1525	3,813	1162	2,906	1612	4,031
4	16	2025	5,087	2125	5,366	2175	5,492	2350	5,962



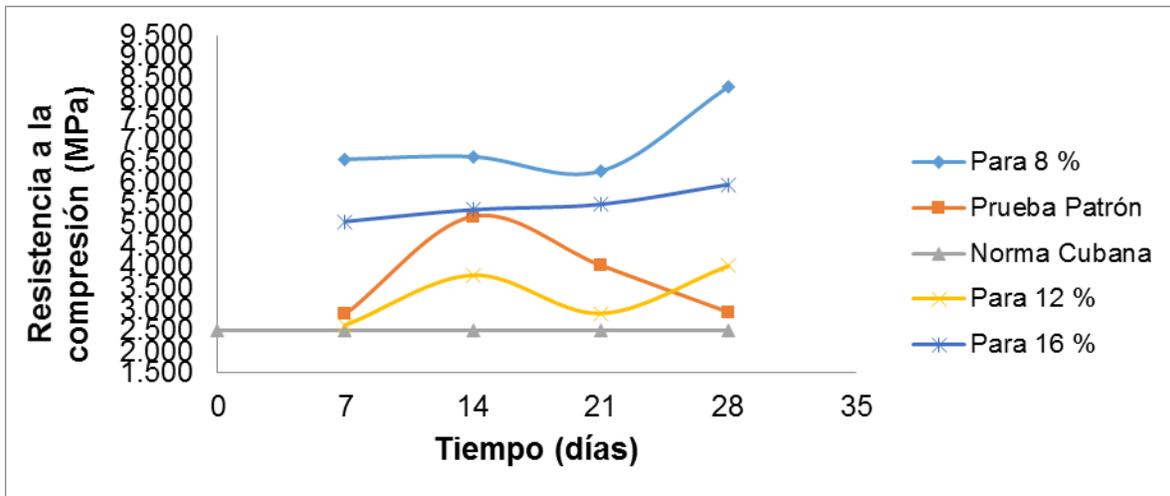
**Figura 3.3** Resistencia a la compresión media para hormigones con sustitución de 8 % de polvo



**Figura 3.4** Resistencia a la compresión media para hormigones con sustitución de 12 % de polvo



**Figura 3.5** Resistencia a la compresión media para hormigones con sustitución de 16 % de polvo.



**Figura 3.6** Resistencia a la compresión media para hormigones con sustitución de 8, 12, 16 % de polvo, patrón y normas cubanas en las edades de 7, 14, 21, 28 día.

### 3.2.4 Resultados de la desviación típica de la muestra de ensayo

Los valores se determinan con el objetivo de saber cuál será el intervalo en que puede variar las deformaciones de los bloques huecos de hormigón como se aprecia en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8** Determinación de las desviaciones típicas promedios

<b>Determinación de la desviación Típica</b>						
<b>N<sup>ro.</sup></b>	<b>Sust. De cemento</b>	<b>Parámetros físico</b>				
		<b>l (mm)</b>	<b>a(mm)</b>	<b>h(mm)</b>	<b>Masa</b>	
<b>1</b>	0	0,136	0,057	0,113	0,071	
<b>2</b>	8	0,227	0,227	0,136	0,067	
<b>3</b>	12	0,227	0,227	0,113	0,114	
<b>4</b>	16	0,181	0,136	0,091	0,029	

### 3.2.5 Resultados de las dimensiones, el área y la absorción

Los parámetros físicos de cada bloque de hormigón ensayado en una media de cada seis bloques en cuanto a las dimensiones, área, y absorción de agua para cada edad se presenta en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9** Determinación de los parámetros físicos

<b>Determinación de las dimensiones, área y absorción</b>							
<b>N<sup>ro.</sup></b>	<b>Sust. De cemento</b>	<b>Parámetros físico</b>					
		<b>l (mm)</b>	<b>a(mm)</b>	<b>h(mm)</b>	<b>Área</b>	<b>Absorción de H<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>Masa</b>
1	0	400,000	99,833	189,833	399,333	9,214	11,717
2	8	399,667	99,667	190,000	398,333	7,743	12,268
3	12	399,667	99,667	190,167	398,333	9,119	11,700
4	16	399,667	99,500	190,333	397,667	5,507	12,067

### 3.3 Impacto medioambiental

El polvo generado en la industria del acero, se ha convertido en una de las mayores causas de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Por otro lado, la acción del viento provoca el esparcimiento de las partículas más finas de estos desechos que contaminan al ecosistema de la ciudad de Las Tunas y zonas aledañas. Los SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> contaminan el aire y mezclados con agua producen la lluvia ácida, algunas sustancias como los clorados, sulfatos y ácidos son corrosivos. 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, entre otros) hacia el manto freático, la aspiración de este residuo por personas que laboran cerca del lugar de vertimiento.

La información aportada en esta investigación, en relación al conocimiento de las características físico y químicas del polvo generado en el horno de arco eléctrico de ACINOX – Las Tunas, facilitará la toma de decisiones para la propuesta de uso de este desecho, como una vía de mitigar las afectaciones medioambientales en el municipio de Las Tunas y contribuir a la economía del país. Usar este residuo generado en ACINOX – Las Tunas, representa eliminar prácticamente la contaminación por esta causa.

## Conclusiones parciales

Según lo analizado anteriormente en este capítulo se arribaron conclusiones siguientes:

- Se comprobó que más del 87 % del polvo generado en los HAE están comprendidos en las clases de tamaño  $-0,8 + 0,08$  mm.
- Para el caso de los morteros con sustitución de 10 % la resistencia a la flexión alcanzó un valor de 1,725 MPa, cumpliendo con las normas establecidas.
- Se demostró durante la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los morteros y bloques huecos de hormigón que, con la adición del polvo generado en los HAE, se obtiene una resistencia máxima a la compresión para los bloques de 8 MPa y para los morteros de 5,3 MPa.
- Se evidenció que los parámetros físicos largo, ancho, altura, absorción media de cada bloque y la masa que están comprendidos en las normas vigentes.
- Se determinó la variación de la desviación típica promedio para cada porcentaje de sustitución en las edades comprendidas, obteniéndose resultados favorables en comparación con las normas cubanas vigentes y patrón de referencia.

## CONCLUSIONES GENERALES

A partir de la caracterización física-química y los ensayos físico-mecánicos realizados, el empleo del polvo de humo generado en los hornos de arco eléctrico de ACINOX-Las Tunas como sustituto parcial del cemento P-35 demostró su perspectiva por lo siguiente:

- El polvo generado en los HAE presentan una granulometría fina. Más del 87 % se encuentra en la clase de tamaño  $-0,8 + 0,08$  mm.
- En los morteros de tipo III se puede sustituir el 10 % de cemento por polvo de humo de hornos de arco eléctrico. Los valores de resistencia a la compresión que se obtienen son superiores a los establecidos en las normas y al patrón de referencia.
- La sustitución de cemento P-35 en la producción de bloques huecos de hormigón por 16 % de polvo generado en los HAE es de gran perspectiva su empleo en la industria de la construcción. La resistencia a la compresión media para esta dosificación es 5,96 MPa, lo que puede reducir el índice de consumo de cemento para la industria de la construcción.
- El empleo de este residuo sólido constituye un significativo aporte a la disminución de la carga contaminante al medio ambiente que produce su deposición.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar la posibilidad de generalizar el empleo del polvo generado en los hornos de arco eléctrico del país como sustituyente parcial del cemento.
- Evaluar la durabilidad de los morteros y bloques huecos de hormigón producidos con la sustitución de cemento por polvo de humo de HAE.
- 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.
- Estudiar el uso del polvo de humo de HAE en la producción de otros prefabricados de pequeños formatos, en aras de diversificar su aplicación para lograr su completo reciclaje.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-EL-ENEIN, S A, HEIKAL, Mohamed, AMIN, M Set NEGM, H H, 2013. Reactivity of dealuminated kaolin and burnt kaolin using cement kiln dust or hydrated lime as activators. In: Construction and Building Materials. octubre 2013. Vol. 47, p. 1451-1460.

ANON., 2017. ADICIONES PARA EL HORMIGÓN. In: [en ligne]. 19 juin 2017. Disponible à l'adresse: <http://www.cuevadelcivil.com/2011/04/adiciones-para-el-hormigon.html>.

ARGOS, 2015. Efectos de las adiciones minerales en el concreto. In: Blog 360 grados en concreto [en ligne]. 18 juin 2015. Disponible à l'adresse: <http://blog.360gradosenconcreto.com/efectos-de-las-adiciones-minerales-en-el-concreto/>.

BARRENECHE, Camila, FERNÁNDEZ, A Inés, NIUBÓ, Maria, CHIMENOS, José M, ESPIELL, Ferran, SEGARRA, Mercè, SOLÉ, Cristian et CABEZA, Luisa F, 2013. Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM)—Polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings. In: Energy and Buildings. 2013. Vol. 61, p. 210-214.

BARRENECHE, Camila, NAVARRO, Lidia, DE GRACIA, Alvaro, FERNÁNDEZ, A Inés et CABEZA, Luisa F, 2016. In situ thermal and acoustic performance and environmental impact of the introduction of a shape-stabilized PCM layer for building applications. In: Renewable Energy. 2016. Vol. 85, p. 281-286.

CHABOT, S.S. et JAMES, S.E, 2000. Treatment of secondary zinc oxides for use in an electrolytic zinc plant. In: Lead - Zinc 2000 Symposium. Estados Unidos: s.n. 2000.

DA SILVA MACHADO, M. J. G., ANDRADE BREHM, F., MENDES MORAES, C., DOS SANTOS, C. et FARIA VILELA, A., 2006. Characterization Study of

- Electric Arc Furnace Dust Phases. In: Mater. Res. 2006. Vol. 9, p. 41-45.
- DE ARAÚJO, José Alencastro et SCHALCH, Valdir, 2014. Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. In: Journal of Materials Research and Technology. 2014. Vol. 3, n° 3, p. 274-279.
- DE LA TORRE, E, GUEVARA, A et ESPINOZA, C, 2013. Valorización de polvos de acería, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis. In: Revista Politécnica. 2013. Vol. 32, n° 1, p. 51-56.
- DE VARGAS, Alexandre S, MASUERO, Ângela B et VILELA, Antônio C F, 2006. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes. In: Cement and Concrete research. 2006. Vol. 36, n° 10, p. 1833-1841.
- DELVASTO, Pedro, IBAÑEZ ALDAO, Bettiana et SANDOVAL RAVOTTI, Daniela, 2011. CARACTERIZACIÓN DE POLVOS DE ACERÍA ELÉCTRICA PRODUCIDOS EN VENEZUELA Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE SU LIXIVIABILIDAD CON ÁCIDOS ORGÁNICOS DILUIDOS. In: Dyna. 2011. Vol. 78, n° 169, p. 221-229.
- DRISSEN, P., KÜHN, M, JUNG, H.P., TAVERNIER, H. et GRISVARD, C., 2002. Recycling of EAF dust into the EAF especially from high alloy steelmaking. In: La Ré- vue de Métallurgie - CIT. S.l.: s.n. 2002. p. 341-347.
- DUTRA, A J B, PAIVA, P R P et TAVARES, L M, 2006. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. In: Minerals Engineering. 2006. Vol. 19, p. 478-485. DOI 10.1016/j.mineng.2005.08.013.
- ENDEMANN, G., LÜNGEN, H.B. et WUPPERMANN, C.D., 2006. Dust, scale and sludge generation and utilization in German steelworks. In: Stahl und Eisen. 2006. Vol. 126, n° 9, p. 25-32.
- FERNÁNDEZ-OLMO, I., LASA, C. et IRABIEN, A., 2007. Modeling of zinc solubility in stabilized/solidified electric arc furnace dust. In: Journal of Hazardous

- Materials. 2007. Vol. 144, n° 3, p. 720-724.
- FERNÁNDEZ PEREIRA, C., RODRÍGUEZ -PIERO, M. et VALE, J., 2001. Solidification/stabilization of electric arc furnace dust using coal fly ash: Analysis of the stabilization process. In: Journal of Hazardous Materials. 2001. Vol. 82, n° 2, p. 183-195.
- GARCÍA-CARCEDO, F., AYALA, N., HERNÁNDEZ, A., PALACIOS, M.A., GARCÍA, E., GOICOECHEA, N et DAÑOBEITIA, L., 1998. Desarrollo de una tecnología más limpia para la obtención de ZnO a partir de residuos generados en la fabricación del acero. In: Revista de Metalurgia. 1998. Vol. 34, p. 432-435.
- GÓMEZ MARIÑO, Alexy, 2014. POLVO GENERADO POR LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO COMO SUSTITUYENTE PARCIAL DEL CEMENTO. Trabajo de Diploma. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- GUÉZENNEC, A.G., HUBER, J.C, PATISSON, F., SESSIECQ, P., BIRAT, J.P et ABLITZER, D., 2005. Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles. In: Powder Technology. 2005. Vol. 157, p. 1-11.
- HANSMANN, Th., FRIEDEN, R. et ROTH, J.L., 2002. Recycling of EAF-dust and of other zinc bearing residues with the PRIMUS - process. Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. In: Technical and Economic Aspects. Lulea, Sweden: s.n. 2002. p. 405-414.
- JENSEN, Jan T et WOLF, K, 1997. Reduction of EAF dust emissions by injecting it into the furnace. In: MPT-Metallurgical Plant and Technology. 1997. Vol. 20, n° 3, p. 58-63.
- KAVOURAS, P, KEHAGIAS, Th, TSILIKA, I, KAIMAKAMIS, G, CHRISAFIS, K, KOKKOU, S, PAPADOPOULOS, D et KARAKOSTAS, Th, 2007. Glass-ceramic materials from electric arc furnace dust. In: Journal of hazardous materials. 2007. Vol. 139, n° 3, p. 424-429.

- LECLERC, Nathalie, MEUX, Eric et LECUIRE, Jean-marie, 2002. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritotriacetate anion and hexahydrated ferric chloride. In: 2002. Vol. 91, p. 257-270.
- LUTANDULA, Michel Shengo et KASHALA, Guylain Ngoy, 2013. Zinc oxide production through reprocessing of the electric arc furnace flue dusts. In: Journal of Environmental Chemical Engineering. 2013. Vol. 1, n° 3, p. 600-603.
- MACHADO, G M S, ANDRADE, Feliciane, ALBERTO, Carlos, MORAES, Mendes et ALBERTO, Carlos, 2006. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. In: Journal and Hazardous Materials. 2006. Vol. B136, p. 953-960. DOI 10.1016/j.jhazmat.2006.01.044.
- MACHADO MARTINS, F., DOS REIS NETO, J. M. et DA CUNHA, C., 2008. Mineral phases of weathered and recent electric arc furnace dust. In: Journal and Hazardous Materials. 2008. Vol. 154, p. 417–425.
- MADÍAS, Jorge, 2009. Reciclado de polvos de horno eléctrico. In: Actualización tecnológica. 2009. p. 38-47.
- MORCALI, M H, YUCEL, O, AYDIN, A et DERIN, B, 2012. Carbothermic reduction of electric arc furnace dust and calcination of waelz oxide by semi-pilot scale rotary furnace. In: Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy. 2012. Vol. 48, n° 2, p. 173-184.
- NYIRENDA, R. L., 1991. The processing of steelmaking flue-dust: a review. In: Minerals Engineering. 1991. Vol. 4, p. 1003-1025.
- OLANO ESTEVEZ, Geovannis, 2009. ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y CONDICIONES QUE PROPICIAN LA FORMACIÓN DE SOPLADURAS EN PRODUCTO FINAL EN LA EMPRESA ACINOX TUNAS. Trabajo de Diploma. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- ORESCANIN, V., MIKELIC, L., SOFILIC, T., RASTOVCAN- MIOC, A., UZAREVIC,

- K., MEDUNIC, G., ELEZ, L. et LULIC, S., 2007. Leaching properties of electric arc furnace dust prior/ following alkaline extraction. In: Environ. Sci. Heal. A. 2007. Vol. 42, p. 323 – 329.
- PEREIRA, C Fernández, GALIANO, Y Luna, RODRIGUEZ-PINERO, M A et PARAPAR, J Vale, 2007. Long and short-term performance of a stabilized/solidified electric arc furnace dust. In: Journal of hazardous materials. 2007. Vol. 148, n° 3, p. 701-707.
- PEREIRA, C Fernández, LUNA, Y, QUEROL, X, ANTENUCCI, D et VALE, J, 2009. Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers. In: Fuel. 2009. Vol. 88, n° 7, p. 1185-1193.
- QUARANTA, N., LALLA, N., VIEIRA, C.M.F., SANCHEZ, R., MONTEIRO, S.N. et DIAS, C.A.C.M., 2009. Use of steel-making plant wastes into clayey ceramic. In: Congreso SAM-CONAMET. S.l.: Actas del Congreso (CD). 2009.
- QUARANTA, N.E. et LALLA, N.S, 2010. UTILIZACIÓN DE POLVO RESIDUAL DE ACERÍA ELÉCTRICA COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE TEJUELAS CERÁMICAS. In: IBEROMET XI X CONAMET/SAM. Viña del Mar, Chile: s.n. 2010. p. 8.
- RANITOVIC, M, KAMBEROVIC, Ž, KORAC, M, GAVRILOVSKI, M, ISSA, H et ANDIC, Z, 2014. Investigation of possibility for stabilization and valorization of electric arc furnace dust and glass from electronic waste. In: Science of Sintering. 2014. Vol. 46, n° 1, p. 83-93.
- RODRÍGUEZ, Dariennis, 2016. Utilización del polvo generado por el Horno de Arco Eléctrico de la Empresa Acinox-Tunas como pigmento. Tesis de ingeniería. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- ROSALES MARTÍN, Gualberto, 2016. UTILIZACIÓN DEL POLVO GENERADO EN HORNOS DE ARCO ELECTRICO COMO OXIDANTE EN LA PRODUCCIÓN DE ACEROS. Tesis de Maestría. Moa, Cuba: Instituto

Superior Minero Metalúrgico de Moa.

- RUETTEN, J., 2006. Application of the Waelz technology on resource-recycling of steel mill dust. In: SEASIS Quarterly. 2006. Vol. 35, n° 4, p. 13-19.
- SALIHOGU, Guray, PINARLI, Vedat, SALIHOGU, Nezhil Kamil et KARACA, Gizem, 2007. Properties of steel foundry electric arc furnace dust solidified/stabilized with Portland cement. In: Journal of Environmental Management. 2007. Vol. 85, n° 1, p. 190-197.
- SHAWABKEH, R., 2010. Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust. In: Hydrometallurgy. 2010. Vol. 104, p. 61–65.
- SOFILIC, T., NOVOSEL-RADOVI, V., CERJAN-STEFANOVIC, S. et RASTOVCAN-MIOC, A., 2005. The mineralogical composition of dust from an electric arc furnace. In: Mater. Tehnol. 2005. Vol. 39, p. 149-154.
- SOUTHWICK, L.M., 2008. From dust to iron: New directions in EAF dust processing. In: AIST Seminar on Alternative Raw Materials. S.l.: s.n. 2008. p. 1-35.
- TÁPANES ROBAU, D, ALVAREZ PALACIOS, T et CHARLES SENGUDEN, T A, 2001. Utilización del polvo de acería de horno de arco eléctrico. In: Ingeniería Mecánica. 2001. Vol. 1, p. 11-17.
- YE, G., BURSTRÖM, E., MACCAGNI, M., BIANCO, L. et STRIPPLE, H., 2004. REZIN - New ways to recover zinc from EAF dust. In: SCANMET II. Lulea, Sweden: s.n. 2004. p. 501-509.