

# Propiedades físicas de hormigones elaborados con dos tipos de residuos de procesos industriales

## Physical properties of elaborated concretes with residuals of industrial processes

Yaser Pérez Zayas<sup>1</sup>, Yasser A. León Benavides<sup>2</sup>, René Puig Martínez<sup>3</sup>, Nelson Emilio Díaz Brito<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: ypzayas@civil.cujae.edu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional 

Recibido: 27 de abril del 2017      Aprobado: 15 de julio del 2017

### Resumen

El aumento de las inversiones en La Habana trae como consecuencia un mayor consumo de áridos naturales, cada vez más agotados, lo que muestra la necesidad de considerar el empleo de los residuos de procesos industriales para ser usados como áridos en los hormigones. La sustitución de áridos por residuos que cumplan las propiedades exigidas a estos materiales es una opción empleada en otros países. En este artículo se presentan los resultados del estudio realizado con dos tipos de residuos. Se evalúan las propiedades de los hormigones con sustituciones de arena por ENHAE y RCD en proporciones de 0, 25, 50, 75 y 100 %. Los resultados muestran que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de arena, los hormigones obtenidos alcanzan mayores resistencias a compresión en todas las edades evaluadas, lo que evidencia la conveniencia de empleo de ENHAE y RCD como sustituto de la fracción fina.

Palabras claves: escorias negras de hornos de arco eléctrico (ENHAE), sustitución, hormigón, residuos de construcción y demolición (RCD)

### Abstract

The increase of the investments in Havana results in a bigger consumption of arid natural. What shows that the one in route to continuing should consider the employment of the residuals of industrial processes to be used as arid in the concretes? The substitution of arid for residuals that complete the properties demanded to these materials, is an option used in other countries. In this sense, the results of a study are presented carried out with two types of residuals. The properties of the concretes are evaluated with substitutions of sand by ENHAE and RCD in proportions of 0, 25, 50, 75 and 100 %. The results showed that as it increased the percent of substitution of sand, the obtained concretes reached bigger resistances to compression in all the evaluated ages; for what is considered convenient the employment of ENHAE and RCD like substitute of the fine fraction.

Key words: black slag, substitutions, concrete

## INTRODUCCIÓN

La generación de residuos en La Habana, la ciudad más densamente poblada de Cuba, es un problema tanto económico como medioambiental [1, 2, 3]. El incremento de las inversiones trae como consecuencia un mayor consumo de áridos naturales, contribuyendo con el agotamiento de las canteras. Por otro lado se genera una enorme cantidad de residuos de diferente tipo que ocupa gran parte de espacios que pudieran ser altamente aprovechables.

Ello exige el estudio de vías de empleo de materiales alternativos, como por ejemplo, las escorias negras de hornos de arco eléctrico (ENHAE) provenientes de la Empresa Siderúrgica Antillana de Acero José Martí y los residuos de construcción y demolición (RCD). Actualmente la Antillana de Acero tiene una producción promedio mensual de 140 00 t de todos los tipos de acero que allí se fabrican, lo que genera un 15 % de escoria negra equivalente a unos 103 3 m<sup>3</sup>. El 85 % de la producción de esta industria es del tipo de acero SAE-1025, que se toman para la investigación.

En La Habana se generan aproximadamente 180 0 m<sup>3</sup>/mes de residuos de construcción y demolición (RCD) [1], según estimados a partir de datos contabilizados por la Oficina Nacional de Estadísticas (ONEI) de Cuba.

En ambos casos es excesiva la contaminación ambiental por la lixiviación de sustancias en el caso de las escorias y la generación de polvo para los RCD. De existir una infraestructura tecnológica adecuada se pudiera pensar en el manejo apropiado de estos residuos, convirtiéndolos en productos con valor agregado.

La fabricación de áridos reciclados a partir ambos es una alternativa que permite proteger los recursos naturales, disminuyendo la explotación de las canteras, los costes de transporte y minimizando el impacto ambiental [4,5]

El presente trabajo alcanza mayor importancia a partir de los estudios realizados con vistas a evaluar la sustitución parcial y total de los áridos finos que se emplean en una planta de hormigón premezclado de La Habana, por la fracción fina que se pudiera obtener de ambos residuos.

## MATERIALES

### Áridos

Los áridos empleados en la investigación tienen la siguiente procedencia: el árido grueso de la cantera Alacranes en la provincia de Matanzas, distante a unos 100 km al este de La Habana; la arena procede de la cantera Victoria IV, en la provincia de La Habana; el residuo de construcción y demolición (RCD) proviene de las paredes de una vivienda construida con bloque; la escoria se obtuvo del proceso de fabricación de acero en la Empresa Siderúrgica José Martí (Antillana de Acero). Toda la caracterización de los áridos, así como los ensayos a los hormigones, se ajustan a los documentos normativos vigentes en Cuba.

En las figura 1 se muestran las curvas granulométricas obtenidas para cada uno. Se puede observar que para el árido grueso (gravilla de Alacranes) más del 80 % del peso del árido se retiene por encima del tamiz No. 4. La arena Victoria IV, el RCD y la ENHAE presentan una granulometría que se puede considerar continua.

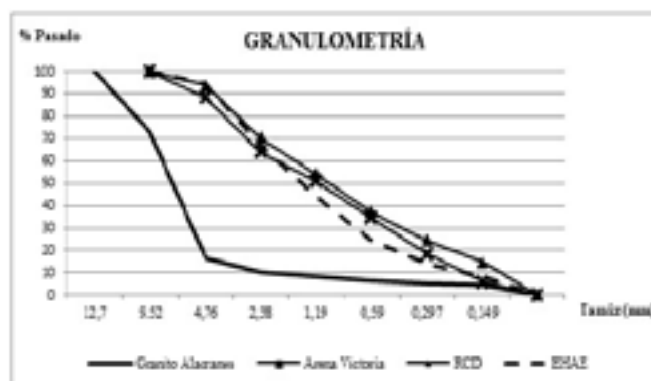


Fig. 1. Curva granulométricas de los áridos empleados

En la tabla 1 se resumen los resultados de las propiedades evaluadas a los áridos, apareciendo en color rojo aquellas que no cumplen las especificaciones normadas. Puede observarse que la ENHAE no presenta elevado peso específico y tiene relativamente bajo porcentaje de absorción, comportamiento que debe ser contrario en áridos obtenidos a partir de residuos de la industria del acero [1-3, 6-10]. El RCD presenta un elevado porcentaje del tamiz 200 (el doble de lo

especificado en la norma) y un bajo peso específico corriente, característico de estos tipos de áridos según la literatura. El porcentaje de material más fino que el tamiz 200 de la gravilla y la arena Victoria supera el límite dado en la norma, poniendo de manifiesto insuficiencias en el proceso de obtención de áridos triturados en el occidente del país.

Tabla 1. Propiedades de los áridos

Propiedad	Unidad de medida	Especificaciones normadas	Resultados de los ensayos			
			Granito Alacranes	Arena Victoria	Arena RCD	Arena ENHAE
PUS	kg/m <sup>3</sup>		1 382,80	1 329,23	1 452,46	2 051,06
PUC	kg/m <sup>3</sup>		1 547,70	1 593,31	1 586,27	2 279,93
PEC	g/cm <sup>3</sup>		2,58	2,38	2,24	3,59
PES	g/cm <sup>3</sup>		2,64	2,45	2,34	3,64
PEA	g/cm <sup>3</sup>	> 2,5	2,74	2,56	2,50	3,79
Tamiz 200	%	1 a 5	4,12	3,57	10,55	5,71
Absorción	%	3	2,25	2,94	4,58	1,44
Tamaño máximo	mm		12,10	4,76	4,76	4,76
Módulo de finura		2,2 a 3,58	5,76	3,37	3,05	3,48

### Cemento

El cemento utilizado es un portland P-35 (35MPa), proveniente de la fábrica de Mariel, en la provincia de Artemisa. En la tabla 2 se muestran los resultados de la caracterización físico-mecánica de este.

### Aditivo

El aditivo empleado es un superfluidificante, retardador de fraguado, reductor de agua de alto rango, de elevadas resistencias iniciales, para hormigones premezclados (DYNAMON SRC 120), de la firma MAPEI, con densidad de 1,10 kg/L, uno de los más empleados en la fabricación de hormigón en la capital. En la tabla 3 se resumen sus propiedades.

Tabla 2. Propiedades del cemento P – 35 Mariel

Propiedades	Unidad de medida	Especificaciones normadas	Resultado de los ensayos
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	3,1 – 3,15	3,08
Superficie específica	cm <sup>2</sup> /g	≥ 2 800	3 110
Consistencia normal	%		24,9
Tiempo de fraguado inicial	minutos	≥ 45	102
Tiempo de fraguado final	horas	≤ 10	3,02
Peso unitario	kg/m <sup>3</sup>		1 168
Finura tamiz 4 900	%		1,7
Resistencia a compresión 3 días 7 días 28 días	MPa	17 25 35	16,19 24,01 38,5

Tabla 3. Propiedades del aditivo Dynamon SRC 20

Propiedad	Unidad de medida	Especificaciones normadas	Resultados de los ensayos
Porcentaje de sólido total	%	16,43	26,5
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,10 ± 0,02	1,09
pH		De 5 a 6 ± 1	7,7

## FASE EXPERIMENTAL

La primera etapa de la investigación se realiza para confeccionar la curva de vacío mínimo de cada una de las combinaciones utilizadas (0, 25, 50, 75 y 100 %) en sustitución de arena por residuos y elaborar las mezclas de prueba, dirigido a obtener asentamiento en el cono de Abrams entre 22 y 24 cm. El método empleado para diseñar las dosificaciones fue el del ACI, fijando una relación agua/cemento de 0,5 y variando los contenidos de aditivos para obtener el asentamiento esperado.

La segunda etapa de la investigación corresponde a la confección de las probetas y la evaluación de las propiedades en estado fresco, en este caso, densidad y laborabilidad; y en estado endurecido, densidad, velocidad de ultrasonido, resistencia a compresión y velocidad de absorción.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados obtenidos en la primera etapa

En la figura 2 se aprecian los resultados de los porcentajes de vacío mínimo para los distintos tipos de residuos y los porcentajes de sustitución de arena por residuos

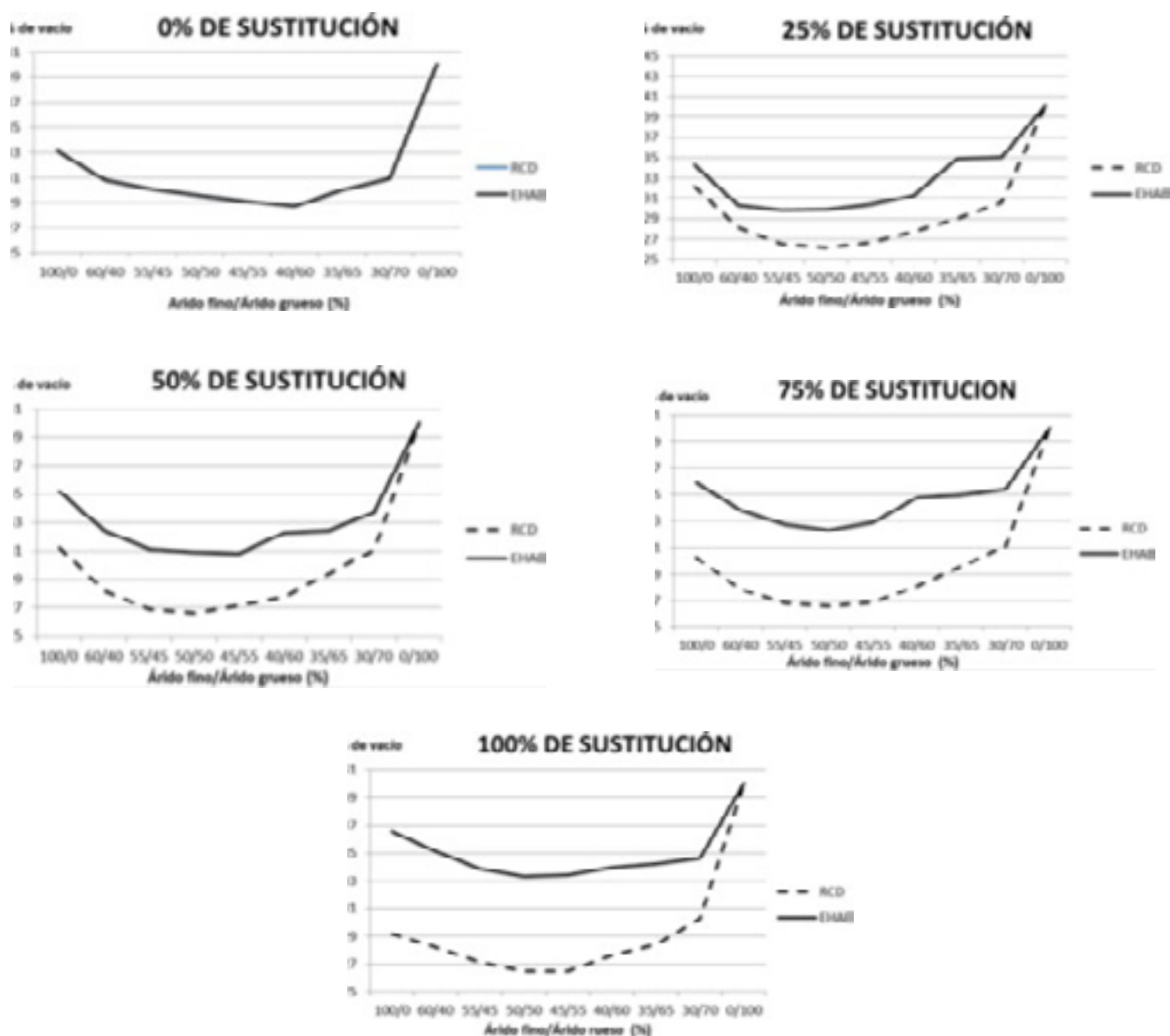


Fig. 2. Gráfico de porcentajes de vacío, para diferentes porcentajes de sustitución de ENHAE y RCD

Se puede observar en ambos residuos que los valores más bajos de porcentajes de vacío se encuentran entre 55/45 y 40/60 de proporciones de árido fino/árido grueso. Se evidencia además, que con el aumento del porcentaje de escoria en la mezcla aumenta el porcentaje de vacío, pero disminuye con el incremento del porcentaje de RCD.

El diseño de las mezclas de prueba con ENHAE se inició con la sustitución del 100 % de la fracción de árido fino, proporción más desfavorable por presentar mayor porcentaje de vacío (figura 2), obteniendo hormigones con falta de pasta para la combinación 44/55 (la de más bajos porcentajes de vacío), lo que exige realizar nuevas dosificaciones con proporciones de AF/AG diferentes, obteniendo los mejores resultados para 70 % de árido fino y 30 % de grueso. Todas las probetas confeccionadas también se inspeccionaron visualmente.

Con la experiencia obtenida empleando ENHAE, al emplear RCD se parte de un hormigón patrón que no estuviera falto de finos, en este caso con proporción 60/40.

Además, con el fin de obtener mezclas laborables, en las dosificaciones con ENHAE se emplea 1 % de aditivo para sustitución de la fracción fina en 0, 25 y 50 %; y 0,5 % de aditivo para sustitución de la fracción fina en 75 y 100 %. En las dosificaciones con RCD se emplea 1% en todas las sustituciones. A través de las mezclas de prueba, queda comprobado además, que con concentraciones de aditivos superiores a los valores antes especificados ocurre segregación en la mezcla.

En las tablas 4 y 5 se resumen los resultados de las dosificaciones de las mezclas de prueba.

Tabla 4. Dosificaciones de mezclas de prueba con empleo de ENHAE

% de sustitución	Relación a/c	Pesos de materiales (kg)					
		Agua	Cemento	Arena	EHAE	Granito	Aditivo
0	0,5	207	414	1 126		483	4,1
25	0,5	207	414	899	300	514	4,1
50	0,5	207	414	640	640	549	4,1
75	0,5	207	414	344	1 031	589	2,1
100	0,5	207	414		1 484	636	2,1

Tabla 5. Dosificaciones de mezclas de prueba con empleo de RCD

% de sustitución	Relación a/c	Pesos de materiales (kg)					
		Agua	Cemento	Arena	EHAE	Granito	Aditivo
0	0,5	207	414	973		649	4,1
25	0,5	207	414	723	241	642	4,1
50	0,5	207	414	477	477	636	4,1
75	0,5	207	414	236	709	630	4,1
100	0,5	207	414		936	624	4,1

### Resultados obtenidos en la segunda etapa

En la segunda etapa de la fase experimental se evalúan las propiedades de las mezclas. En estado fresco se investigan la densidad y la laborabilidad; en estado endurecido, se estudian densidad, resistencia a compresión, velocidad del pulso ultrasónico y velocidad de absorción, todas a 7 y 28 días.

En las figuras 3 y 4 se muestran respectivamente los resultados obtenidos en estas labores en la ENHAE y el RCD. Se aprecia que en todos los casos el asentamiento aumenta con el incremento del porcentaje de sustitución de arena por residuos para iguales contenidos de aditivo, lo que puede explicarse por el incremento de las partículas muy finas en los residuos. Si se consulta la tabla 1 puede apreciarse que la escoria tiene 5,71 % de material más fino que el tamiz 200, y el RCD un 10,55 %, en tanto la arena tiene solo un 3,57 %, superior al 3 % establecido por la NC 251 para los áridos finos.

El comportamiento de la densidad, tanto en estado fresco como endurecido, es similar. Con el empleo de ENHAE, tanto la densidad en estado fresco y como estado endurecido aumentan con el incremento del porcentaje de este en la mezcla de hormigón. Sin embargo, para el RCD disminuye. En las figuras 5 y 6 se aprecian respectivamente las variaciones de las densidades en estado fresco y endurecido.

Estos resultados se explican por las magnitudes de los pesos unitarios de cada uno de los materiales participantes en la dosificación, lo que puede ser comprobado en la tabla 1.

En las tablas 6 y 7 aparecen los resultados de la prueba de rango múltiple realizada con el programa Stat Graphics 5 respectivamente para ENHAE y RCD, apreciando que cada porcentaje de sustitución de escorias, en todos los casos,

resulta estadísticamente diferente. En el caso del RCD, no todos los valores son estadísticamente diferentes, ya que existen grupos homogéneos integrados por porcentajes de sustitución de 25 y 50 %, de 50 y 75 % y de 75 y 100 %. Solo el hormigón patrón no se encuentra en ningún grupo.

La figura 7 muestra los resultados de la resistencia a compresión a la edad de 28 días de los hormigones con distintos porcentajes de ENHAE y RCD.

En el caso de la ENHAE se aprecian dos etapas: con el incremento de su porcentaje en el hormigón hasta el 50 %, la resistencia aumenta notablemente, sin embargo, a partir de un 75 % de sustitución aumenta solo un 3 %. No obstante, aunque se detectaron diferencias entre la resistencia a compresión de los hormigones del segundo grupo y los restantes, las propiedades con porcentajes de sustitución son superiores al patrón.

Para el RCD ocurre lo contrario, con su incremento en la mezcla hasta un 50 % disminuye la resistencia de 36,92 kg/cm<sup>2</sup> a 28,4 kg/cm<sup>2</sup>; y con proporciones del 50 al 100 % se incrementa de 28,48 MPa a 35,97 MPa, demostrando la influencia del residuo en la propiedad.

En este caso la prueba de rangos múltiples sugiere la existencia de tres grupos homogéneos, en los cuales estadísticamente no existen diferencias significativas. Estos son 0, 75 y 100 %, 10 y 25 % y 50. Solo las proporciones de 75 y 100 % tienen valores similares al patrón. Ello puede ser apreciado en las tablas 8 y 9 respectivamente para ENHAE y RCD5.

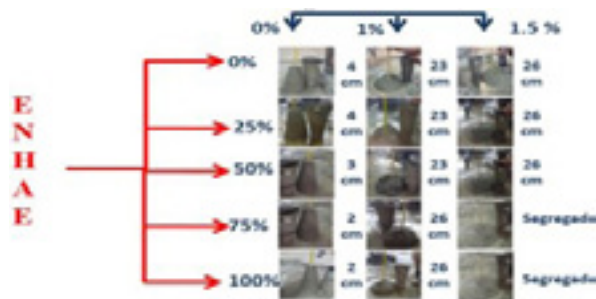


Fig. 3. Resultados del ensayo de laborabilidad en ENHAE

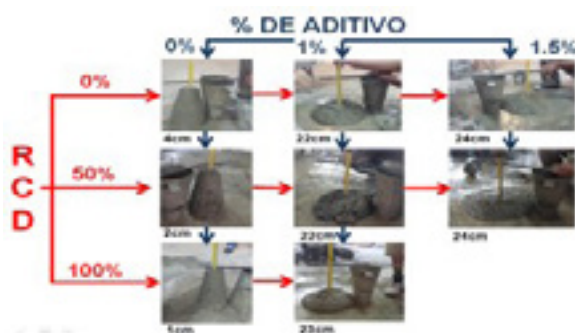


Fig. 4. Resultados del ensayo de laborabilidad para el RCD

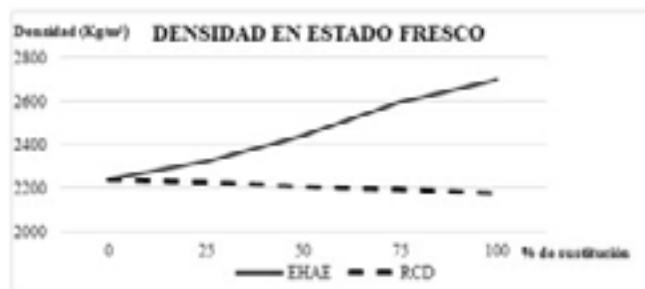


Fig. 5. Resultados del ensayo de densidad en estado fresco

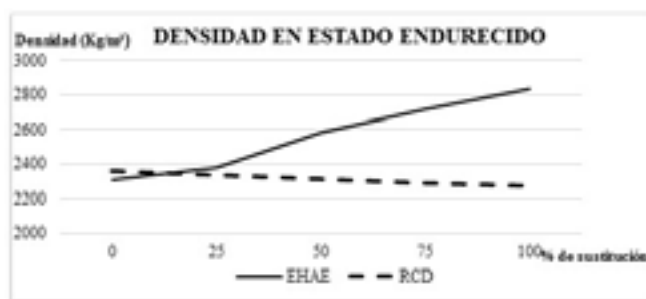


Fig. 6. Resultados del ensayo de densidad en estado endurecido

Tabla 6. Prueba de rangos múltiples para la densidad en estado endurecido a los 28 días con ENHAE

% EHAE	Count	Mean	Homogeneous Groups				
0	3	2305	X				
25	3	2 378,7		X			
50	3	2 579,7			X		
75	3	2 714,7				X	
100	3	2 833,3					X

Tabla 7 Prueba de rangos múltiples para la densidad en estado endurecido a los 28 días con RCD

% RCD	Count	Mean	Homogeneous Groups				
0	3	2 361,67	X				
25	3	2 332,33		X			
50	3	2 312,67		X	X		
75	3	2 289			X	X	
100	3	2 275,67				X	

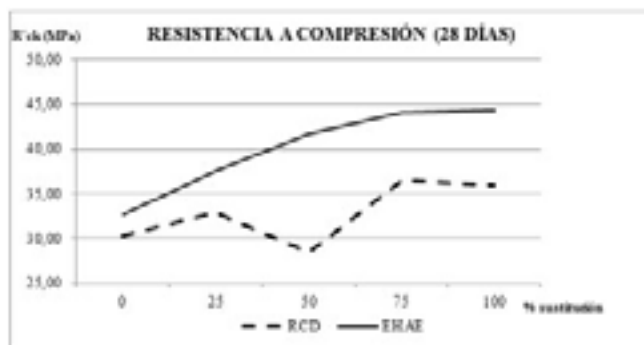


Fig. 7. Resistencia a compresión de los hormigones a 28 días

Tabla 8. Prueba de rangos múltiples para la resistencia a compresión a los 28 días con ENHAE

% ENHAE	Count	Mean	Homogeneous Groups				
0	3	32,67	X				
25	3	37,52		X			
50	3	41,63			X		
75	3	44,04			X		
100	3	44,26			X		

Tabla 9. Prueba de rangos múltiples para la resistencia a compresión a los 28 días con RCD

% RCD	Count	Mean	Homogeneous Groups			
50	3	28,40	X			
25	3	32,87		X		
100	3	35,97		X	X	
75	3	36,51			X	
0	3	36,92			X	

Según la red DURAR [11], los hormigones investigados presentan alta calidad. Ello lo corrobora el ensayo de velocidad del pulso ultrasónico, lo que ilustra la influencia del árido reciclado en la dosificación de los hormigones. Los mejores resultados se obtuvieron con el empleo de la ENHAE, con una tendencia estable al incremento de la velocidad del pulso ultrasónico con el aumento de sus proporciones en la mezcla. Con el empleo de RCD ocurre lo contrario los valores tienden a disminuir. En la figura 8 se aprecian los resultados.

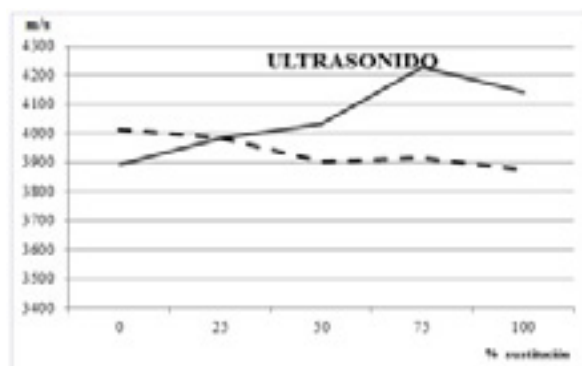


Fig. 8. Comportamiento de la velocidad del pulso ultrasónico a los 28 días

La prueba de rangos múltiples muestra la existencia de tres grupos de semejanza: 0 y 25 %; 25 y 50 %; y 75 y 100 %, aunque sin diferencias significativas entre las proporciones. Los resultados de las pruebas de rangos múltiples se aprecian en las tablas 10 y 11 respectivamente para sustituciones con ENHAE y RCD.

Tabla 10. Resultados de la prueba de rango múltiple para la velocidad de ultrasonido con ENHAE

% ENHAE	Count	Mean	Homogeneous Groups			
0	3	3 892,0	X			
25	3	3 984,0	X	X		
50	3	4 030,67		X		
100	3	4 141,33			X	
75	3	4 228,0			X	

Tabla 11. Resultados de la prueba de rango múltiple para la velocidad de ultrasonido con RCD

% RCD	Count	Mean	Homogeneous Groups			
100	3	3 874,33			X	
50	3	3 904,3			X	
75	3	3 916,33			X	
25	3	3 983,3			X	
0	3	4 013,33			X	

En el caso de la absorción capilar se identifican dos momentos. El primero cuando esta aumenta hasta un 50 % de sustitución; y el segundo entre 50 y 100 %, en que disminuye la velocidad de absorción capilar. Ello puede apreciarse en la figura 9.





Fig. 9. Comportamiento de la velocidad de absorción capilar

## CONCLUSIONES

Después de realizada esta investigación se puede arribar a las siguientes conclusiones:

1. La ENHAE presenta peso unitario suelto elevado, ocurriendo lo contrario con el RCD, lo que influye en que las densidades de los hormigones con sustitución parcial de ENHAE por arena sean superiores a los de los hormigones patrones y a los de los hormigones elaborados con sustitución parcial de RCD por arena.
2. El porcentaje de material más fino que le tamiz 200 supera en ambos residuos el 5 % normado en la NC 251.
3. El porcentaje de absorción de los hormigones elaborados con ENHAE es bajo, elemento favorable para incrementar las propiedades de durabilidad; sin embargo, con sustitución parcial de RCD es superior al 3 % exigido por la NC 251.
4. El incremento de las proporciones de ENHAE en los hormigones aumenta la resistencia de este material a 28 días, con independencia de la proporción; pero con el empleo de RCD, se aprecia un decrecimiento para proporciones hasta de un 50 % de sustitución parcial y a partir de ahí, un incremento de esta propiedad.
5. Siempre con el incremento de las proporciones de ENHAE se aprecia un aumento de la velocidad del pulso ultrasónico en los hormigones, lo que se explica por el aumento de la densidad; a diferencia de ello, con el incremento de RCD disminuye la velocidad del pulso ultrasónico.
6. La velocidad de absorción capilar disminuye a partir de un 50 % de sustitución de residuos por arena.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Unión de Construcciones Militares por facilitar todos los materiales y medios para el desarrollo de la investigación, así como a la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría y al laboratorio del Centro de Investigaciones Técnicas de la Construcción, por su participación en la investigación.

## REFERENCIAS

1. Marrero Rodríguez MS. Empleo de las escorias de acerías para la elaboración de morteros [Tesis de maestría]. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría; 2011.
2. Ormazábal FJ, Larrañaga E. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones escorias de acerías. País Vasco, España: Departamento de ordenación del territorio, vivienda y medioambiente. IHOBE Sociedad Pública Gestión Ambiental; 1997.
3. Boza M. Utilización de las escorias de acería como material de construcción. Holguín, Cuba: Universidad de Holguín; 2011.
4. Pavón E. Utilización de árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural en La Habana, Cuba. In: Nom Conventional Materials and Technologies (NOCMAT); Colombia: 2008.
5. Pavón E. Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural [Tesis de maestría]. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría; 2010.
6. CEDEX. Escoria acería LD. España2007. <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=217&idmenu=241>.
7. CEDEX. Humo de sílice. España2007. [Citado Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=217&idmenu=241>].
8. CEDEX. Cenizas volantes de carbón. España2011. [Citado Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=217&idmenu=241>].

9. CEDEX. Escoria acería de horno de arco eléctrico. España 2011. [Citado Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=217&idmenu=241>].
10. Amaral de Lima L. Hormigones con escoria de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental [Tesis de doctorado]. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Barcelona; 1999.
11. Durar MI. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructura de hormigón. Rio de Janeiro, Brasil: CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo; 1997.