

Nota Técnica:
Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado
en La Habana, Cuba

*Technical Note:
Applicability assessment of concrete with recycled coarse aggregates
in Havana, Cuba*

E. Pavón^(*), M. Etxeberria^(**), N. E. Díaz^(*)

Recepción/Received: 15-X-10
Aceptación/Accepted: 08-IV-11
Publicado online/Online publishing: 24-I-12

RESUMEN

Los estudios de viabilidad realizados recientemente en La Habana, Cuba, muestran elevadas cifras de producción de residuos de construcción y demolición (RCD). Los últimos datos conocidos de generación de escombros de hormigón alcanzan valores cercanos a los 1.800 m³/mensual. Esta situación unida al agotamiento de los áridos en las zonas cercanas a la capital hace necesaria la utilización de estos escombros como áridos en la fabricación de hormigones. En el trabajo realizado se trituraron escombros de hormigón de cuatro orígenes diferentes, después de su caracterización se fabricaron hormigones con 25%, 50% y 100% de árido reciclado y con relaciones agua-cemento de 0,45, 0,50 y 0,55. A partir de la evaluación de las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad obtenidas por los hormigones reciclados, se define la aplicabilidad de los mismos como hormigón estructural para ser utilizados en los diferentes tipos de ambientes de agresividad que tiene definido la normativa cubana.

Palabras clave: residuos, reciclado, áridos, hormigón.

SUMMARY

The recent viability studies carried out in Havana, Cuba, according to natural or recycled aggregates, exhibited high volume production of construction and demolition waste (CDW). The last well-known data of concrete waste generation reached to 1800 m³/month. This situation, together with the depletion of the quarry aggregates closed to the capital, requires the use of such debris as aggregate for concrete production. In this work, four origin recycled concrete aggregates (RCA) were produced and characterized. Recycled aggregate concrete with 25%, 50% and 100% of RCA and 0.45, 0.50 and 0.55 of water-cement ratio were produced. Physical, mechanical and durability properties of those concretes were determined and evaluated, and their applicability as structural material in different aggressive environments according to Cuban normative was defined.

Keywords: waste, recycled, aggregate, concrete.

^(*) Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (La Habana, Cuba).
^(**) Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España).

1. INTRODUCCIÓN

La generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) constituye un problema tanto económico como ambiental, que se agudiza en la medida que se incrementa el volumen de producción de los mismos. Los volúmenes de RCD producidos a nivel internacional constituyen un elevado porcentaje del total de los residuos generados por la sociedad. De acuerdo con datos aportados por Tam *et al.* (1), estos valores son bastante dispersos en los diferentes países y oscilan entre el 10 y 70%. La producción de los mismos, según Lage (2), alcanza cifras en el orden de los 300 a los 750 kg/hab/año. En caso particular de los residuos de hormigón, representan, según resultados obtenidos de la misma fuente, entre un 5 y un 65% del total de RCD, predominando los países con valores alrededor de un 40%. El problema principal con este tipo de residuo está relacionado con su deposición irregular y los grandes volúmenes que ocupa. De ahí que estos se trituren obteniéndose áridos reciclados que serán usados en la fabricación de hormigones.

La Habana, con un área de 727 km² y una población de 2,2 millones de habitantes, es la capital de la República de Cuba y es el centro de la actividad económica en el país y constituye de las 14 provincias la de mayor volumen de producción de residuales. En el caso de Cuba según datos de la Dirección de Planeamiento y Servicios Comunes, el Ministerio de Economía y Planificación y la Oficina Nacional de Estadísticas, la cantidad de residuos recolectados está en el orden de los 350 kg/hab/año (2001-2006) (3).

En La Habana se genera alrededor del 37% del total de los desechos de Cuba, casi las 2/5 partes, lo que resalta la importancia del reciclaje en esta provincia y, por ello, la necesidad de estudiar los residuos que en ella se producen. Las cantidades generadas tienden a incrementarse en los últimos años, debido, entre otros factores, a la mejora del nivel de vida de la población capitalina, avalado por el incremento de los ingresos monetarios de la población, sobre todo a partir del año 2002. Según datos de la Oficina Nacional de Estadística (3), los ingresos han ascendido paulatinamente desde los 22,6 hasta los 38,9 millones de pesos, entre el 2002 y el 2007, respectivamente.

De acuerdo con estudios de viabilidad realizados entre el 2006 y el 2008 (4), las cifras de producción de RCD son elevadas, alcanzando valores alrededor de los 1.170 m³

diarios, de los cuales el 5% corresponden a los residuos de hormigón (5). En un año pueden estar alrededor de los 15.000 m³. Este residuo proviene de la demolición selectiva de edificaciones en mal estado (35%), de empresas constructoras (50%) y plantas de prefabricados (10%). Aunque tanto la utilización del árido reciclado en la fabricación de hormigones como su influencia en las propiedades físicas y mecánicas ha sido ampliamente estudiados (6-23), hay una necesidad de estudiar la aplicabilidad de los áridos reciclados en hormigones de acuerdo a la normativa cubana existente respecto a los requisitos mínimos exigidos como hormigón estructural. La norma cubana NC 250: 2005 tiene definido 4 tipos generales de ambientes de exposición para hormigones estructurales atendiendo a la agresividad del ambiente: muy alta, alta, media y baja. La mayor parte de las estructuras de hormigón se encuentran ubicadas en los tres últimos tipos de ambiente, se considera como ambiente de agresividad alta a las estructuras situadas en la franja costera a más de 500 m y hasta 3 km del mar en la costa norte, como media a las estructuras situadas en la franja costera a más de 3 km y hasta 20 km y como baja a las estructuras situadas a más de 20 km de la costa. Para cada uno de estos ambientes se establecen unos requisitos de diseño de durabilidad para estructuras de hormigón armado (relación a/c máxima y resistencia a compresión) para la mezcla de hormigón (ver Tabla 1).

Mediante este trabajo se analizó la aplicabilidad de los áridos reciclados para hormigones utilizables en ambientes de agresividad alta, media y baja. Para ello se llevó a cabo una fase experimental constituida por 2 etapas experimentales. En la etapa 1 se estudió la influencia del origen y del porcentaje de utilización de árido reciclado en las propiedades del hormigón endurecido para definir la posible utilización de estos hormigones en ambientes de exposición de agresividad medio-baja. Para este estudio se utilizaron 4 tipos de áridos reciclados utilizados procedentes de 4 hormigones de distintas propiedades.

En la etapa 2, se fabricaron hormigones con áridos reciclados de baja calidad (siendo esta la que más abunda en La Habana) para analizar la viabilidad de la utilización de este material en la fabricación de hormigones estructurales durables que puedan estar expuestos a diferentes ambientes agresivos. Este análisis se llevó a cabo mediante el análisis de los ensayos de resistencia a compresión a largo plazo, la velocidad de ultrasonido y la resistividad.

Tabla 1. Requisitos de durabilidad por ambientes de agresividad.

Ambientes de agresividad	Relación agua / cemento efectivo	Resistencia a compresión (MPa)
Alta	0.45	30
Media	0.50	25
Baja	0.55	20

2. MATERIALES

2.1. Áridos gruesos

2.1.1. Obtención del árido grueso

Árido reciclado

Se utilizaron áridos reciclados provenientes de cuatro fuentes diferentes. Cada uno de ellos de diferente calidad, dado fundamentalmente por las propiedades del hormigón de origen. La Tabla 2 muestra un resumen de la resistencia a compresión, densidad y absorción de los cuatro escombros utilizados para la producción de árido reciclado: 1) demolición selectiva de un edificio de oficinas, del cual se utilizó el hormigón de las losas prefabricadas del entrepiso (AR1); 2) probetas que fueron sometidas a ensayo de resistencia a compresión de un laboratorio de Materiales de Construcción (AR2); 3) hormigón de paneles de fachadas defectuosos producidos en una planta de prefabricado (AR3); 4) losas de cubierta y de pisos defectuosas producidos en una planta de prefabricado (AR4).

En Ciudad de la Habana no existe hasta el momento ninguna planta de tratamiento a escala industrial destinada a la obtención de árido grueso reciclado, por lo que fue necesaria la búsqueda de otra alternativa para el procesamiento de los escombros.

Con el fin de obtener árido grueso de la mejor calidad posible para la fabricación de hormigón estructural se

trituró el escombro en una machacadora de mandíbula, la cual produce áridos con una buena distribución de tamaños y un reducido contenido de finos (24). Además este tipo de trituradora es la que tiene concebida el Ministerio de la Construcción para el tratamiento de los volúmenes de residuos producidos en la ciudad, según estudios realizados por el organismo en septiembre de 2007 (25). La machacadora utilizada corresponde a una pequeña máquina de mandíbula de simple efecto (Figura 1), a escala de laboratorio.

Tras la trituración de los escombros, se separó la fracción fina para finalmente obtener el árido grueso reciclado, material utilizado en la investigación.

Árido natural

Se utilizó árido grueso natural calizo (AN), proveniente de la cantera de Alacranes, en la provincia de Matanzas.

2.1.2. Propiedades de los áridos gruesos

Tanto el árido grueso reciclado como el natural se caracterizaron de acuerdo con las normativas cubanas utilizadas en la evaluación de los áridos gruesos naturales. A continuación en la Figura 2 se muestra la granulometría obtenida en los cinco casos, de acuerdo a la NC 178: 2002. Se observa que la granulometría de los cuatro áridos reciclados era similar al árido natural obteniéndose en todos los casos un tamaño máximo de 19 mm.

Tabla 2. Propiedades del hormigón de origen de los escombros.

Nº	Origen del escombro	Resistencia compresión (MPa)	Densidad (kg/dm ³)	Absorción de agua (%)	Nombre árido reciclado
1	Edificio de oficinas	>40	2.43	2.0	AR1
2	Laboratorios de Materiales	25-35	2.12	5.5	AR2
3	Planta de Paneles	17-25	2.03	11	AR3
4	Planta de losas de Cubiertas	15-20	2.06	10	AR4

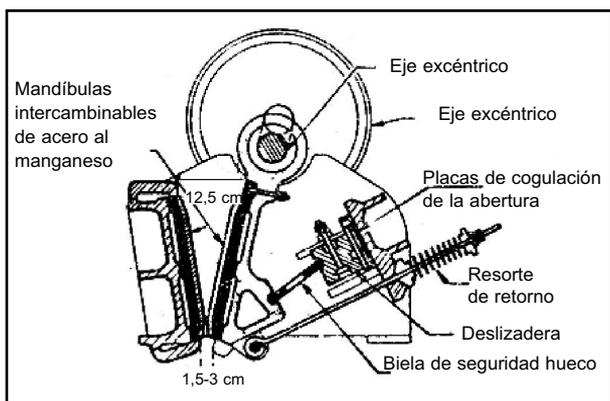


Figura 1. Machacadora de Mandíbula.

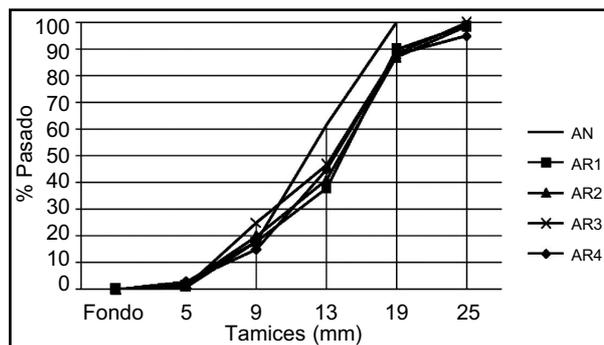


Figura 2. Granulometría de los áridos gruesos.

En la Tabla 3 se observan las propiedades de los áridos reciclados. La densidad y absorción de agua se determinaron de acuerdo a la norma NC 187:2002, la masa unitaria suelta por la NC 181:2002, el índice de lajas por la NC 189:2002 y las partículas que pasan por el Tamiz #200 (74 µm) por la NC 182:2002.

Los áridos obtenidos de escombros de hormigón de peor calidad producen áridos de menor densidad y mayor porcentaje de absorción tal y como se esperaba de acuerdo a los resultados obtenidos por otros investigadores (26-28). Por otro lado estos tienen una forma más redondeada.

2.2. Árido fino (AF)

El árido fino empleado fue calizo proveniente de la cantera "La Victoria", se caracterizó de acuerdo con las normativas cubanas. La Figura 3 muestra la granulometría obtenida de acuerdo a la norma NC 178:2002.

Tal y como se pudo observar el árido fino era bastante grueso, con una importante falta de finos, ya que por el tamiz #30 solo pasaba alrededor de un 20% del material.

El modulo de finura de la arena fue de 3,52. La utilización de este tipo de arenas trae como consecuencia incrementos en los consumos de cemento a la hora de fabricar el hormigón.

En la Tabla 4 se observan los resultados de las propiedades evaluadas al árido fino de acuerdo a la norma NC 186:2002 para el caso del peso específico y absorción de agua, NC 181:2002 para la masa unitaria suelta y NC 182:2002 para el tamiz #200.

2.3. Cemento y aditivo

2.3.1. Cemento

El cemento utilizado es un portland P-350 (35MPa), proveniente de la fábrica de Mariel, en la provincia de Artemisa. Los ensayos de caracterización se realizaron de acuerdo con la normativa cubana. En la Tabla 5 se muestran los resultados de la caracterización físico-mecánica del mismo y la Tabla 6 los resultados de la composición química. Los ensayos físico mecánicos y la composición química se determinaron de acuerdo a las NC 54-207:2000 y NC 54-206:2000, respectivamente.

Tabla 3. Propiedades de los áridos gruesos.

Tipo	Densidad (kg/dm ³)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/dm ³)	Índice de lajas (%)	% pasa tamiz #200
AN	2.61	1.6	1.38	11.0	0.20
AR1	2.57	3.4	1.26	13.7	0.31
AR2	2.34	6.5	1.22	4.1	0.60
AR3	2.17	7.6	1.15	3.4	0.74
AR4	2.13	8.8	1.19	3.1	0.65

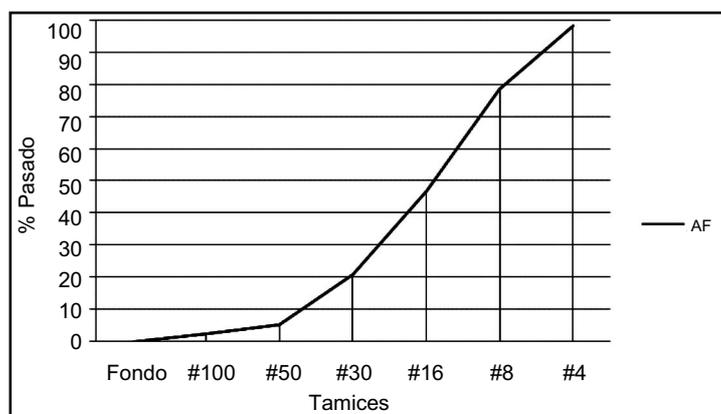


Figura 3. Granulometría del árido fino.

Tabla 4. Propiedades del árido fino.

Propiedad	
Peso específico corriente (kg/dm ³)	2.48
Absorción (%)	2.4
Densidad aparente (Kg/dm ³)	1.44
% pasa tamiz #200	0.5

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas del cemento.

Físicos	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	3089
Peso específico (kg/dm ³)	3.12
Mecánicos	
Resistencia-flexo tracción 28días (MPa)	7
Resistencia-compresión 28días (MPa)	41

Tabla 6. Composición química del cemento.

Compuestos	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	RI	SO ₃	PPI	Cal libre	Na ₂ O	K ₂ O
%	20.83	4.09	3.85	60.65	1.81	1.46	3.1	3.56	1.29	0.53	0.42

2.3.2. Aditivo

El aditivo empleado es un superfluidificante (N100 RC), de Mapei de 1,16 g/l, uno de los más empleados en la fabricación de hormigón en la ciudad.

3. FASE EXPERIMENTAL

La fase experimental se llevó a cabo en dos etapas. El objetivo de la etapa 1 fue determinar la calidad mínima del árido grueso reciclado y el porcentaje óptimo de sustitución del árido grueso natural, de forma tal que los hormigones elaborados con los áridos reciclados cumplieran los requisitos que establece la normativa cubana NC 250: 2005 para ser empleados en ambientes de agresividad media, utilizando la relación a/c efectiva de 0,5, la máxima permisible.

En la segunda etapa de la fase experimental se utilizó un solo tipo de árido grueso reciclado (AR4, el de peor calidad y de mayor volumen de existencia en la La Habana)

y se confeccionaron hormigones con el objetivo de comparar el porcentaje de árido grueso natural que pudiera ser sustituido por árido grueso reciclado en la confección de los hormigones con relaciones a/c efectiva de 0,45, 0,5 y 0,55, correspondientes con el valor máximo establecido por la NC 250:2005 para ser utilizados en ambientes de agresividad alta, media y baja, respectivamente. Esta etapa experimental permitió asociar el máximo porcentaje de sustitución admisible (del árido natural por el árido reciclado) con el tipo de ambiente en que podrían ser utilizado los hormigones reciclados. Además se realizó el estudio de la durabilidad a partir de los ensayos de velocidad de ultrasonido y resistividad de los hormigones fabricados con relación a/c de 0,45.

3.1. Dosificación y fabricación de hormigones

La Tabla 7 muestra las dosificaciones empleadas en la fabricación del hormigón convencional y fabricados con áridos reciclados correspondientes a la etapa 1 de la fase experimental.

Tabla 7. Dosificaciones de los hormigones fabricados en la etapa 1.

Hormigón	Cemento (kg)	Agua efectiva (kg)	Árido fino (kg)	Árido grueso natural (kg)	Árido grueso reciclado (kg)	Aditivo (%)	Asentamiento (cm)
HC	430	215	773	872	0	0.75	13
HR1-25	430	215	773	654	215	0.75	11
HR1-50	430	215	773	436	430	0.75	10
HR1-100	430	215	773	0	859	0.75	14
HR2-25	430	215	773	654	196	0.6	12
HR2-50	430	215	773	436	391	0.6	11
HR2-100	430	215	773	0	782	0.4	12
HR3-25	430	215	773	654	181	0.5	13
HR3-50	430	215	773	436	363	0.4	13
HR3-100	430	215	773	0	725	0.3	14
HR4-25	430	215	773	654	178	0.6	13
HR4-50	430	215	773	436	356	0.6	13
HR4-100	430	215	773	0	712	0.4	14

Nota: Hormigón convencional o patrón (HC). Los números de 25, 50 y 100 en cada uno de los hormigones corresponden al porcentaje de sustitución de árido grueso natural por el reciclado.

Tabla 8. Dosificaciones de los hormigones fabricados en la etapa 2.

Hormigón	Cemento (kg)	Agua efectiva (kg)	Árido fino (kg)	Árido grueso natural (kg)	Árido grueso reciclado (kg)	Aditivo (%)	Asentamiento (cm)
HC-0.45	458	206	773	872	0	1	12
HR4-25-0.45	458	206	773	654	178	0.8	13
HR4-50-0.45	458	206	773	436	356	0.8	12
HR4-100-0.45	458	206	773	0	712	0.6	14
HC-0.5	430	215	773	872	0	0.75	13
HR4-25-0.5	430	215	773	654	178	0.6	13
HR4-50-0.5	430	215	773	436	356	0.6	13
HR4-100-0.5	430	215	773	0	712	0.4	14
HC-0.55	405	223	773	872	0	0.3	13
HR4-25-0.55	405	223	773	654	178	0.2	13
HR4-50-0.55	405	223	773	436	356	0.2	14
HR4-100-0.55	405	223	773	0	712	0	12

Nota: Los números de 0,45, 0,50 y -,55 corresponden a la relación agua-cemento utilizada.

En la Tabla 8 se observan las dosificaciones utilizadas en la etapa 2 de la fase experimental. Los hormigones fabricados con relación agua/cemento de 0,5 corresponden los mismos a los hormigones de la etapa 1.

Los hormigones se fabricaron en una hormigonera estacionaria de acción gravitacional basculante con una capacidad de 30 litros. Los áridos reciclados se utilizaron saturados en todos los casos. Para la caracterización de los hormigones se fabricaron probetas cilíndricas de 10 x 20 cm, diámetro y altura, respectivamente. Las mismas se compactaron en dos capas, con 25 golpes de fija en cada una ellas. El asentamiento del hormigón fresco se fijó en 12 ± 2 cm.

El hormigón se mantuvo dentro de los moldes un tiempo de 24 horas en un cuarto de curado húmedo y al cabo de dicho plazo se procedió al desencofre. A partir de este momento el curado de las probetas se realiza sumergido en piscina hasta la edad de ensayo.

3.2. Ensayos sobre hormigón endurecido

En todos los hormigones fabricados en la etapa 1 y 2 se determinaron la densidad saturada y la absorción de acuerdo a la norma NC ISO 6725:2005 además de la resistencia a compresión a los 28 días de acuerdo con la NC 244: 2005. Además en todos los hormigones fabricados en la etapa 2 se determinó la resistencia a compresión a los 91 días.

Para evaluar la durabilidad, en los hormigones diseñados para ambientes de agresividad alta se determinaron la velocidad de ultrasonido (29, 30) a la edad de 28 y 91 días de acuerdo a la norma NC 231:2003, con el fin de correlacionar esta propiedad con los valores de resistencia a compresión y la resistividad, según el procedimiento descrito en la Red Durar (31).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA FASE EXPERIMENTAL

4.1. Resultados obtenidos en la etapa 1

La Figura 4 muestra los resultados de la resistencia a compresión a la edad de 28 días de los cuatro hormigones reciclados. Se puede observar que no se detectaron diferencias entre la resistencia a compresión del hormigón convencional y los hormigones reciclados para sustituciones inferiores al 50%. Todos los hormigones obtuvieron resistencias superiores a 25 MPa siendo esta la mínima resistencia permitida para que los hormigones puedan ser utilizados en un ambiente de agresividad media. En los hormigones fabricados con 50%, a pesar de existir diferencias de un 15% en la resistencia a compresión entre el hormigón fabricado con el árido de mejor calidad (HR1-0,5) y de peor calidad (HR4-0,5), todos los hormigones obtuvieron la mínima resistencia exigida por la normativa. En los cuatro hormigones fabricados con 100% de árido reciclado se observaron caídas de resistencias del 15% en el hormigón HR1 y hasta un 35% en el hormigón HR4 respecto al hormigón convencional. No obstante, el hormigón HR1 donde se utilizó el árido AR1 con densidad de 2,57 y 3,4% de absorción obtuvo los mínimos requisitos establecidos para la exposición del hormigón fabricado en un ambiente de agresividad media. En los estudios realizados por Tabsh y Abdelfatah (32) donde se fabricaron hormigones de 100% de sustitución y áridos de similares características, se obtienen pérdidas de resistencias con respecto al hormigón convencional de 30%, similar a las obtenidas en el estudio experimental realizado.

De acuerdo a los resultados obtenidos, sería posible utilizar áridos con densidad superior a $2,13 \text{ kg/dm}^3$ y absorción de agua inferior al 9% (que corresponde con el AR4)

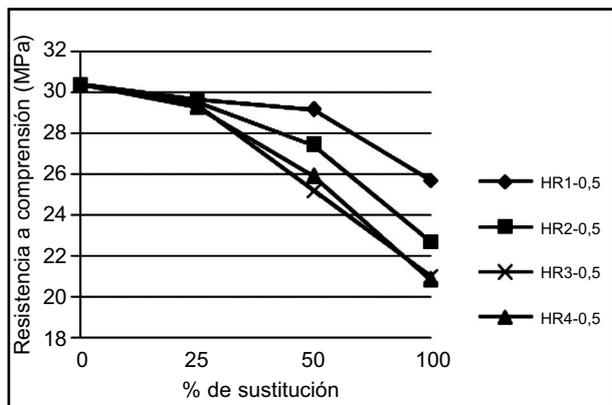


Figura 4. Resistencia a compresión de los hormigones de la etapa 1 a 28 días.

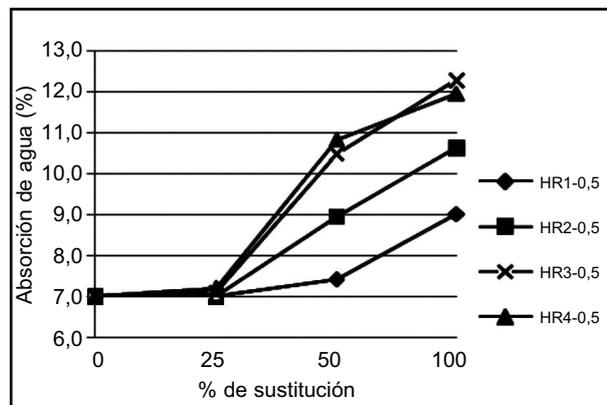


Figura 5. Absorción de agua de los hormigones de la etapa 1 a 28 días.

en sustituciones de hasta un 50% para fabricar hormigones reciclados que pudieran estar expuestos a ambientes de mediana agresividad.

La Figura 5 ilustra la influencia de la presencia del árido reciclado en la capacidad de absorción del hormigón reciclado. Y se observa que la capacidad de absorción de hormigones con la misma cantidad de áridos reciclado se agudiza cuando se utilizan áridos de peor calidad (áridos de mayor capacidad de absorción). Los hormigones con sustituciones de un 25% de árido reciclado no presentaron diferencias con respecto al hormigón patrón, mientras que los hormigones fabricados con porcentajes superiores al 50% sufrieron un crecimiento de la absorción entre el 20 y el 70% respecto al hormigón convencional, exceptuando el HR1-50, que en su caso no superó el 5%. Estos resultados coinciden plenamente con los resultados obtenidos en la resistencia a compresión donde se pudo concluir que solo en el caso del hormigón fabricado con 25% de árido reciclado (independientemente del tipo del mismo), no se detectó diferencia con el hormigón patrón, tal y como ya se había descrito en otras investigaciones anteriores (8, 21). Los hormigones HR3 y HR4 tuvieron similares comportamiento tanto en la resistencia a compresión como en la capacidad de absorción.

4.2. Resultados obtenidos en la etapa 2

4.2.1. Resistencia a compresión

La Figura 6 muestra los resultados de la resistencia a compresión a los 28 días de los hormigones fabricados con el árido AR4, con vistas a determinar el porcentaje óptimo de sustitución para que el hormigón con árido reciclado pueda ser utilizado en cada uno de los tipos de ambientes definidos con anterioridad.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede afirmar que los hormigones fabricados podrían ser utilizados,

dependiendo del porcentaje de sustitución, en los tres tipos de ambientes de exposición definidos. En todos los hormigones fabricados con relación a/c efectiva de 0,45 y 458 kg de cemento por m³ de hormigón, hormigones expuestos a ambientes agresivos, sería posible utilizar hasta 100% de sustitución de árido reciclado, ya que supera la resistencia de 30 MPa, a pesar de apreciarse en hormigones con 100% de árido reciclado una disminución del 15% de la resistencia respecto al hormigón patrón. Los hormigones fabricados con 25 y 50% de áridos reciclado obtuvieron similares resistencias al hormigón patrón.

En los hormigones fabricados para ambientes de agresividad media con relación a/c efectiva de 0,5 y 430 kg de cemento/m³ de hormigón, de acuerdo a los resultados obtenidos solo sería posible emplear el árido reciclado en un 25 y 50% en sustitución al árido natural ya que en el caso del hormigón fabricado con 100% de árido reciclado no alcanzó la resistencia de 25 MPa. El hormigón con 25% de árido reciclado obtuvo similar resistencias al hormigón patrón.

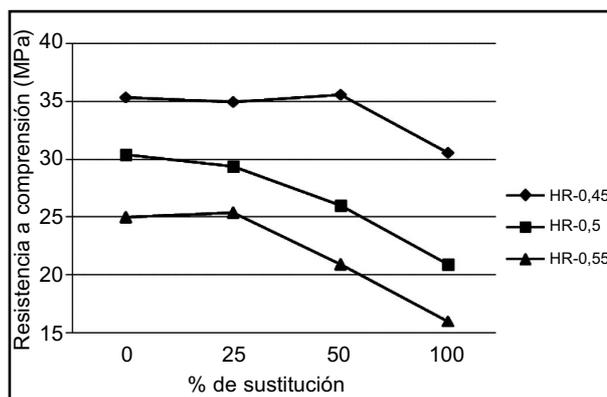


Figura 6. Resistencia a compresión de los hormigones con diferentes relaciones a/c.

En los hormigones diseñados para ambientes de agresividad baja con relación a/c efectiva de 0,55 y 405 kg de cemento/m³ de hormigón, solo los hormigones fabricados con el 25% y 50% de árido reciclado obtuvieron la resistencia mínima establecida para este tipo de ambiente (20 MPa). Los hormigones fabricados con 100% de AR sufrieron una reducción de la resistencia del 30% respecto al hormigón patrón y solo el hormigón con 25% de AR presentó un comportamiento similar al hormigón patrón.

4.2.2. Ensayos de durabilidad

Las Figuras 7 y 8 reflejan la resistencia a compresión y velocidad de ultrasonido en el tiempo, respectivamente, del hormigón HR4 (hormigón fabricado con árido AR4, árido reciclado de baja calidad) fabricado con relación a/c de 0,45 y 458 kg de cemento por m³ de hormigón, a las edades de 7, 28 y 91 días.

Tal y como se puede ver en la Figura 7, los hormigones fabricados con un 25% y 50% de árido reciclado obtuvieron resistencias similares al hormigón patrón a 28 días de curado y se corroboró que todos estos hormigones tenían un comportamiento similar a lo largo del tiempo. Para el caso del HR100, las diferencias son notables con respecto al HC, a partir de los 28 días se apreció un reducción del 12% en la resistencia a compresión.

De acuerdo a la Figura 8, se aprecia que el hormigón con 100% de árido reciclado, HR100, tiene la menor velocidad de ultrasonido a cualquier edad del hormigón, debido a la alta porosidad del material. En este tipo de materiales también se aprecia la similitud entre la curva velocidad de ultrasonido *versus* edad del hormigón con la curva resistencia compresión *versus* edad del hormigón, tal y como se puede ver en otros trabajos de investigación (33-35).

A los 7 días de edad, se apreció una ligera disminución (menor al 5%) de la velocidad del ultrasonido en el hormigón

HR50 con respecto al HC. Los valores de velocidad de onda ultrasónica de todos los hormigones reciclados evaluados estaban por encima de los 4.000 m/s, por lo que se clasifican atendiendo a su calidad como hormigones durables, según la Red Durar (31, 36). De acuerdo a Jones y Gatfield (37), el límite inferior para un hormigón de buena calidad está entre 4.100 y 4.700 m/s.

Se puede destacar que a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado la velocidad de ultrasonido disminuye (38). En los estudios realizados por Di Maio (20), los hormigones fabricados con árido reciclado obtuvieron valores similares a los obtenidos en este trabajo, sin embargo, las velocidad de ultrasonido aumentaban a medida que se incrementaba el porcentaje de árido reciclado utilizado, contrario a lo ocurrido en este trabajo, debido a que los hormigones con árido reciclado fueron fabricados con la misma relación a/c efectiva que el hormigón convencional.

4.2.3. Resistencia a compresión-velocidad ultrasónica

La Figura 9 muestra la correlación obtenida entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido entre estos hormigones a la edad de 28 días (cada valor es la media de tres probetas).

La correlación entre ambas propiedades permite estimar, en hormigones de similar relación a/c y a partir de la velocidad de ultrasonido, la resistencia a compresión del hormigón. En la Tabla 9 se comparan los resultados obtenidos de acuerdo a la curva confeccionada para hormigones convencionales por Trtnik (39) con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente.

Se puede apreciar que tanto la resistencia a compresión del hormigón convencional como del hormigón con árido reciclado obtenida experimentalmente es superior al estimado numéricamente con una misma velocidad de ultrasonido,

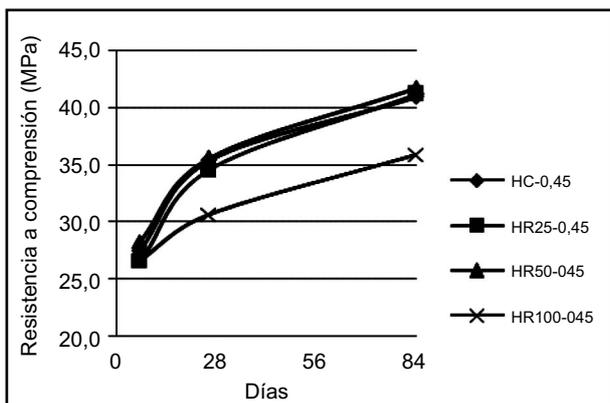


Figura 7. Evolución de la resistencia a compresión de los hormigones de relación a/c de 0,45.

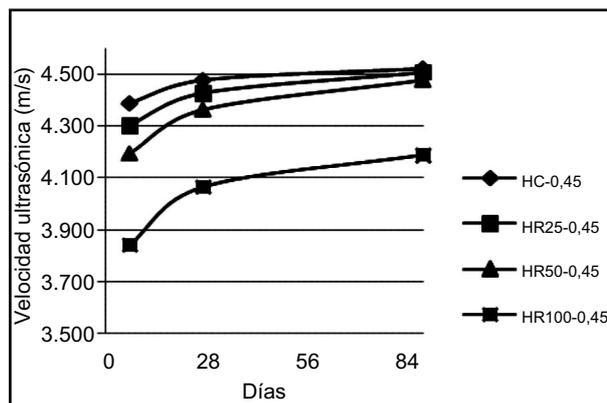


Figura 8. Velocidad de ultrasonido en el tiempo de los hormigones para ambiente agresivos altas.

Tabla 9. Determinación numéricamente (37) y experimentalmente de la resistencia de la compresión a partir de la velocidad de ultrasonido.

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión estimada (MPa)	
	Trtnik $S = 0,0854exp(1,2882Vp)$	Experimentales $y = 6,783exp(0,372Vp)$
HC	27.5	35.9
HR25	25.6 (93%)	35.2 (98%)
HR50	23.7 (92%)	34.4 (96%)
HR100	16.1 (68%)	30.8 (86%)

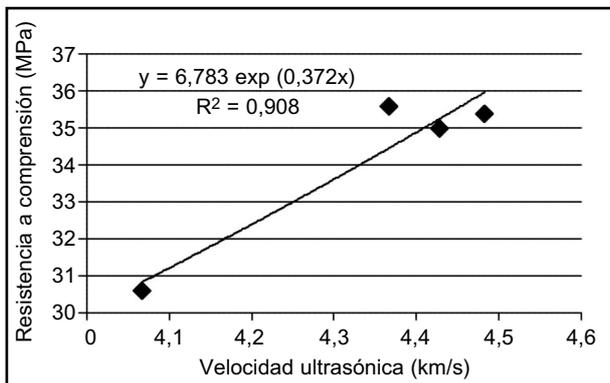


Figura 9. Velocidad de ultrasonido vs Resistencia a compresión a los 28 días.

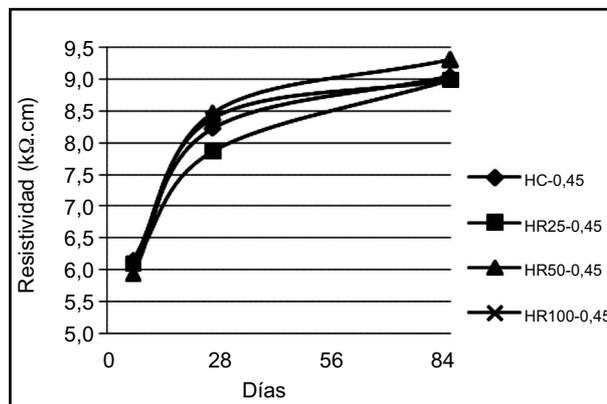


Figura 10. Evolución de las resistividad eléctrica de los hormigones expuestos a ambiente agresivos altas.

siendo una diferencia considerable cuanto mayor porcentaje de árido reciclado se utilice en la fabricación del hormigón. Por lo que se podría decir que de acuerdo a los resultados obtenidos el método definido por Trtnik (para la determinación de la resistencia a compresión a partir de la velocidad ultrasónica) no parece ser válido para hormigones fabricados con árido reciclado.

Por su parte, los resultados de resistividad mostrados en la Figura 10 no se corresponden con las anteriores propiedades evaluadas. En este caso los cuatro hormigones muestran similares valores en cada una de las edades, no observándose diferencia del HR100 con el resto de los hormigones. Probablemente fue debido a que el análisis se realizó con los hormigones saturados.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de la fase experimental se puede concluir que en las dosificaciones estudiadas:

Los hormigones fabricados con 25% de árido grueso reciclado, independiente de la calidad del árido reciclado utilizado, no presentan diferencias en la capacidad de absorción ni en la resistencia a compresión con respecto al hormigón convencional, cuando la densidad del árido reciclado es superior a 2,13 kg/cm³ y absorción inferior al 9%, para relaciones agua-cemento entre 0,45 y 0,55.

Teniendo en cuenta los resultados de resistencia a compresión obtenidos en la fase experimental y los límites máximos de relación a/c establecidos por la norma cubana NC 250: 2005, se podría concluir que siempre y cuando las propiedades del árido reciclado utilizado sean de una densidad superior a 2,13 kg/dm³ y absorción inferior al 9%:

- para la exposición a ambientes de agresividad alta sería posible utilizar el 25, 50 y 100% de árido reciclado en sustitución al árido grueso natural en la fabricación de hormigones cuando se fabricaran con una relación a/c efectiva de 0,45 y 458 kg de cemento por m³ de hormigón.
- Los hormigones que vayan a estar expuestos a ambientes de exposición de agresividad media, se podrá utilizar 25% y 50% de árido reciclado si los hormigones son fabricados con relación agua/cemento de 0,5 y 430 kg de cemento por m³ de hormigón. Para la utilización del 100% de árido reciclado, se requeriría utilizar una relación agua/cemento efectiva de 0,45.
- En hormigones que vayan a estar expuestos a ambientes de agresividad baja, sería posible utilizar un 25% y 50% de árido reciclado si los hormigones son fabricados con relación agua/cemento de 0,55 y 405 kg de cemento por m³ de hormigón. Para la utilización del 100% de árido reciclado sería necesario fabricar el hormigón con una relación a/c efectiva a 0,50 o inferior.
- La velocidad de ultrasonido del hormigón fabricado con una cantidad máxima del 50% es similar al hormigón

convencional, considerándolos como hormigones durables. La reducción en hormigones con 100% de árido reciclado es del 10%.

- Las correlaciones existentes para la determinación de la resistencia a compresión a partir de la velocidad de ultrasonido definidas para hormigones convencionales no son compatibles para hormigones con árido reciclado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID, Ministerio de Asuntos exteriores y de Cooperación) y la Centre de Cooperació i Desenvolupament de la Universitat Politècnica de Catalunya la financiación dada.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Tam, V. W. Y.; Wang, K.; Tam, C. M.: "Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152 (2) (2008), pp. 703-714. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.061>
- (2) Lage, M. I.: "Estudios sobre los residuos de Construcción y Demolición en Galicia: Método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje", en Departamento de Tecnología de la Construcción, Universidad de la Coruña (2006).
- (3) Pavón, E.: "Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural", en Departamento de Ingeniería Civil, Cujae (2010).
- (4) Soto, I.: "Estudio de viabilidad sobre la utilización de los residuos de construcción y demolición en Ciudad de la Habana", en Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría: Ciudad Habana (2008).
- (5) Pavón, E.; Etxeberria, M.; Díaz, N.: "Utilización de los Residuos de hormigón de plantas de prefabricado", en *Ecomateriales*, 14 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Cujae, La Habana, Cuba (2008).
- (6) Nagataki, S.: "Properties of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete", International Workshop on Recycled Concrete (2000).
- (7) Hansen, T. C.: "Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete", *ACI journal* 82, 5 J182-52 (1985).
- (8) Hansen, T. C.; Narud, H.: "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", *Concrete International-Design and Construction* 5 (1) (1983), pp. 79-83.
- (9) Tavakoli, M.; Soroushian, P.: "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate", *ACI Materials Journal* 93 (2) (1996), pp. 182-190.
- (10) Hansen, T. C.: "Recycled aggregate and recycled aggregate concrete, Second State-of-the-art Report developments 1945-1985", *Materials and structures*, vol. 111, RILEM (1986).
- (11) Hansen, T. C.: RILEM: recycling of demolished concrete and masonry, Report of Technical Comité 37-DRC: Demolition and Reuse of Concrete, Chapman & Hall, London (1992).
- (12) Poon, C. S.; Shui, Z. H.; Lam, L.: "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates", *Constr. Build. Mater.*, vol. 18 (2004), pp. 461-468. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
- (13) Sague-Crentsil, K. K.; Brown, T.; Taylor, A. H.: "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate", *Cem. Concr. Res.*, vol. 31 (2001), pp. 707-712. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)
- (14) Tavakoli, M.; Soroushian, P.: "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate", *ACI Materials Journal* (1996), pp. 182-190.
- (15) Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A. R.: "Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete", *Mag. Concr. Res.*, vol. 58 (2006), pp. 683-690. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.2006.58.10.683>
- (16) Poon, C. S.; Shui, Z. H.; Lam, L.: "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened 401 concrete". *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (1) (2004), pp. 31-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)
- (17) Topcu, I. B.; Sengel, S.: "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (8) (2004), pp. 1307-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>
- (18) Zega, C.; Di Maio, A. A.: "Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones", en Proceedings of XV Reunión Técnica y Seminario de Hormigones Especiales, Argentina, Santa Fe [available on CD, in Spanish] (2003).
- (19) Sague-Crentsil, K. K.; Brown, T.; Taylor, A. H.: "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate", *Cem. Concr. Res.*, vol. 31 (5) (2001), pp. 707-712. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)
- (20) Di Maio, A. A.; Zega, C.J.; Traversa, L. P.: "Estimation of compressive strength of recycled concrete with the ultrasonic method", *Cem. Concr. Res.*, vol. 2 (5) (2005).
- (21) Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M.: "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cem. Concr. Res.* 37 (2007), pp. 735-742 <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>

- (22) Nealen, A.; Schenk, S.: "The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties", *Darmstadt Concrete - Annual Journal*, vol. 13 (1998).
- (23) Kokubu, K.; Tshimizu, A.: "Effects of recycled aggregate qualities on the mechanical properties of concrete", *Internacional Workshop on Recycled Concrete*, Tokyo, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Japan Society for the Promotion of Science (2000), pp. 107-115.
- (24) Etxeberria, M.: "Estudios experimentales sobre el comportamiento microestructural y estructural en hormigones con agregados reciclados", en Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña: Barcelona (2004).
- (25) Colectivo de autores.: Estudio de viabilidad para la construcción de una planta de tratamiento de residuos de la construcción y demolición en la Habana, MICONS: Ciudad Habana, Cuba (2007).
- (26) Sánchez de Juan, M.; Alaejos Gutiérrez, P.: "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23 (2009), pp. 872-877. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
- (27) Tam, W. Y.; Gao, X. F.; Tam, C. M.; Chan, C. H.: "New approach in measuring water absorption of recycled aggregates", *Constr. Build. Mater.*, vol. 22 (2008), pp. 364-369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009>
- (28) González-Fontebao, B.; Martínez-Abella, F.: "Hormigones con áridos reciclados: estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas", *Mater. Construcc.*, vol. 55, nº 279 (2005).
- (29) Filipczynski, L.; Pawlowski, Z.: *Ultrasonic Methods of Testing Materials*, Butterworth, London (1966).
- (30) Krautkramer, J.; Krautkramer, H.: *Ultrasonic Testing of Material*, Springer-Verlag, New York (1983).
- (31) Colectivo de autores.: Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Río de Janeiro, Brasil: Subprograma XV, red CYTED (1997).
- (32) Tabsh, S. W.; Abdelfatah, A. S.: "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23 (2009) pp. 1163-1167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>
- (33) Madandoust, R.; Ghavidel, R.; Nariman-zadeh, N.: "Evolutionary design of generalized GMDH-type neural network for prediction of concrete compressive strength using UPV", *Computational Materials Science*, vol. 49 (2010), pp. 556-567. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.05.050>
- (34) Manish, A.; Kewalramani, R.: "Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks", *Automation in Construction*, vol. 15 (2006), pp. 374-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2005.07.003>
- (35) Demirboga, R.; Türkmen, I.; Karakoç, M. B.: "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (2004), pp. 2329-2336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>
- (36) Whitehurst, E. A.: "Sonoscope tests concrete structures", *J. Am. Concr. Inst.* 47 (1951), pp. 443-444.
- (37) Jones, R.; Gatfield, E. N.: "Testing concrete by an ultrasonic pulse technique, DSIR Road Research Tech", *Paper* nº 34, London, H.M.S.O (1955).
- (38) Di Maio, A. A.; Traversa, L. P.: "Evaluación de hormigones reciclados mediante ensayos no destructivos", *Mater. Construcc.* vol. 53, nº 271-272 (2003).
- (39) Trtnik, G.; Kavčič.; Turk, G.: "Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks", *Ultrasonics*, vol. 49 (1) (2009), pp. 53-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>

* * *