

Caracterización físico-química de agregados reciclados

José Antonio Domínguez Lepe / Facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, La Habana, Cuba
Emilio Martínez Lobeck / Facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, La Habana, Cuba
Víctor Villanueva Cuevas / Instituto Tecnológico de Chetumal, Quintana Roo, México

Resumen

En este trabajo se muestran las características físicas y químicas de agregados finos y gruesos obtenidos a través del reciclaje de residuos de construcción y demolición comparadas con las de agregados obtenidos a partir de roca natural de la región. Se concluye que los agregados reciclados pueden sustituir a los agregados obtenidos a partir de la roca natural, pero tomando en cuenta sus características especiales. Por lo anterior, se recomienda el estudio de su utilización con aditivos o bien en concretos sin acero de refuerzo, brindando con esto una importante alternativa sustentable y de menor costo.

Abstract

This work shows the physical and chemical characteristics of fine and thick aggregates from construction and demolition recycled remains, and it compares them to those aggregates coming from natural rock in the region. The conclusion is that the first are able to substitute the latter, if we take account of its specific characteristics. For this reason, the study of its usage together with additives or non steel reinforced-concrete is recommended; this offers a sustainable and cheaper alternative.

La industria de la construcción emplea gran variedad y cantidad de productos y subproductos derivados de la roca natural. Basta con mirar nuestro entorno para darnos cuenta de que desde la cimentación hasta las cubiertas, pasando por la estructura y los muros, el elemento «piedra» está siempre presente en concretos, morteros, bloques, pisos, bovedillas, entre muchas otras, incluso en forma más directa como en las mamposterías, no se diga en la construcción de calles y carreteras. En muchas partes del mundo, hasta hace algunos años, encontrar una cantera de buena calidad y relativamente cercana no era mayor problema pero el empleo extensivo de este recurso, aunado a las restricciones ambientales, ha propiciado que dichas canteras sean cada vez más escasas y lejanas. El aumento en la demanda por el crecimiento natural de la población y la escasez ha originado un incremento en los precios de los productos derivados de la roca. Otro factor es que el aprovechamiento de la piedra o roca implica derribar árboles y retirar la capa vegetal dejando a su paso enormes huecos en el suelo que posteriormente no se puede utilizar para otra actividad económica como la agricultura o la ganadería. Las áreas que quedan después de la explotación tampoco pueden ser utilizadas como habitacionales, porque ello implicaría abrir un hueco más lejano para cubrir el actual y así sucesivamente.

A su vez, la industria de la construcción genera gran cantidad de desechos ya sea por el proceso mismo de construcción o por demoliciones; de hecho, en los países desarrollados es la mayor fuente de residuos industriales,

Nuestro agradecimiento muy especial al Sistema Regional de Investigación Justo Sierra Méndez (SISIERRA) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento brindado a este trabajo de Investigación; al Instituto Tecnológico de Chetumal, por todo el apoyo institucional., y el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana, Cuba, por el apoyo y la tutoría para el desarrollo de los trabajos.

Descriptores:

Palabras clave: Reciclaje de residuos de construcción; Agregados a partir de roca

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 20-I, 2004, pp. 23-29.
Recibido el 18/05/04 - Aceptado el 04/11/04

los cuales fueron evaluados a mediados de la década de los noventa (Molina, 1997) en cerca de 450 kg por habitante por año, y en un estudio más reciente Parra da un rango entre 520 y 760 kg/hab/año (Parra, 2002), sin tomar en cuenta guerras ni desastres naturales. De ese gran volumen el concreto es el más abundante, ya que representa 67% en peso (Frondistou-Yannas, 1985). Este criterio es compartido por Bossink (cf. Bossink y Brouwers, 1996) que ha desarrollado extensos estudios sobre esta temática en Europa. Si al concreto le agregamos otros residuos de origen pétreo como los morteros, la cerámica, bloques y piezas ornamentales entre otros, este porcentaje se vería incrementado y podría llegar hasta 85% del total (Molina, 1997). Generalmente estos materiales de desecho van a parar a vertederos clandestinos, como terrenos baldíos o áreas ecológicas, y en el mejor de los casos se utiliza como relleno, resultando una mala imagen urbana y contaminación.

La problemática descrita es la que motivó el desarrollo de este trabajo de investigación que se enmarca en la filosofía del desarrollo sustentable. La hipótesis inicial fue que los agregados producto del reciclaje de residuos de construcción y demolición cuentan con características que les permiten sustituir en muchos casos a los agregados obtenidos a partir de roca natural. La idea de reciclar residuos de la construcción no es nueva. En Estados Unidos y particularmente en Europa —que se enfrentó después de la Segunda Guerra mundial a sus ciudades destruidas y a un grave problema de acumulación de escombros— se ha comprendido la importancia ecológica y económica del reciclaje, dando lugar a la creación de comités como el RILEM (Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayos e Investigación sobre los Materiales y las Construcciones) y el EDA (European Demolition Association), con la intención de crear y promover normas para la utilización de este tipo de agregados.

En este trabajo se muestran las características físicas y químicas de agregados finos y gruesos obtenidos a través del reciclaje de residuos de construcción y demolición. Sus características fueron comparadas con las de

agregados obtenidos a partir de roca natural de la región. Uno de los aportes de este estudio es que no se recicló únicamente concreto para obtener nuevos agregados, como se hace en los países desarrollados, sino que se utilizó como materia prima material heterogéneo, lo que pensamos corresponde más a la realidad latinoamericana, donde no se encuentra con facilidad la tecnología necesaria para realizar la separación de residuos y en la práctica desgraciadamente no se aplican los mecanismos y principios necesarios para evitar su mezcla. Se estudiaron su peso volumétrico, densidad, absorción, resistencia a la abrasión, granulometría y contenido de materia orgánica. También se realizaron análisis químicos encaminados a detectar agentes nocivos que pudieran afectar la durabilidad del hormigón. Bajo la luz de los resultados obtenidos se puede concluir que tomando las previsiones necesarias los agregados reciclados pueden sustituir eficazmente a los agregados naturales, brindando con esto una alternativa económica y más amigable con la naturaleza.

Metodología

Muestreo de la materia prima

Apegados a los criterios del muestreo determinístico intencional (Namakforoosh, 1993), se recolectaron 42 m³ de residuos¹ de 7 lugares distintos, siempre cuidando que las muestras fueran representativas en volumen y tipo de los desechos generados en la región. Se tomaron residuos de concreto, bloques, bovedillas, cerámica, morteros y acabados diversos. La carga del material a los camiones de volteo se hizo utilizando medios manuales con la finalidad de tener una selección implícita, es decir, verificando que la materia prima estuviera libre de materiales como vidrios, maderas, plásticos, cartones, papel y acero. Una vez que se contó en la planta trituradora con el volumen total especificado, se realizó una inspección final para verificar y en todo caso mejorar la limpieza de la materia prima.

Foto 1
Recolección
de la materia
prima



Foto 2
Inspección
de la materia
prima



Obtención de agregados a través de trituración

Con los 42 m³ de desechos se obtuvieron por trituración tres tamaños de agregado: 15 m³ de fino, 5 m³ de grava y 12 m³ de agregado grueso. El proceso es el mismo que se emplea para la roca natural, con la doble finalidad de tener un punto de comparación y referencia con los agregados naturales e incidir favorablemente en la motivación de los productores acerca de la producción de estos materiales, al no tener requerimientos especiales para ello.

Caracterización de los agregados

Una vez obtenidos los nuevos agregados, fueron trasladados a las instalaciones del Instituto Tecnológico de Chetumal, en México, para aplicarles las pruebas de labo-

ratorio necesarias según las normas de la ASTM (American Society for Testing and Materials), a fin de determinar sus características. Estas características tienen su aplicación en el momento de diseñar concretos u otros elementos constructivos como bloques, bovedillas, viguetas, entre muchos otros. Paralelamente se tomaron muestras de material natural, para realizar los mismos estudios como punto de comparación y referencia. Los procedimientos se desarrollaron de acuerdo con lo indicado en las normas mostradas que muestra el cuadro 1.

La caracterización química se realizó en el Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción (CTDMC) de La Habana, Cuba y según «Metodología para análisis de silicatos» elaborada por el Laboratorio Central de Minerales Isaac del Corral del año 1986.

Foto 3
Trituración de los desechos



Foto 4
Apilado de los nuevos agregados

Cuadro 1
Normas ASTM aplicadas

Nº de prueba	Nombre de la prueba	Norma ASTM
1	Determinación del peso volumétrico del agregado grueso (seco y suelto)	ASTM C29/C29M-97
2	Determinación del peso volumétrico del agregado grueso (seco y compacto)	ASTM C29/C29M-97
3	Densidad y absorción del agregado grueso.	ASTM C127-01
4	Análisis granulométrico del agregado grueso.	ASTM C136-01 ASTM C33-03
5	Resistencia a la abrasión del agregado grueso	ASTM C131-03 ASTM C33-03
6	Determinación del peso volumétrico del agregado fino	ASTM C29/C29M-97
7	Densidad y absorción del agregado fino.	ASTM C128-01e1
8	Análisis granulométrico del agregado fino	ASTM C33-03, ASTM C136-01
9	Impurezas orgánicas en el agregado fino	ASTM C40-04 ASTM D 1544-98

Resultados

Las pruebas de laboratorio arrojaron los resultados que se ofrecen en los cuadros 2 y 3.

Como se puede observar en el cuadro 2, para el agregado grueso tanto el PVSS como el PVSC del material producto del reciclaje están por arriba del material natural con una diferencias de 68 kg/m³ (6,0%) para PVSS y 38 kg/m³ (3,2%) para PVSC. Esto indica que el material reciclado tiene mejor acomodo entre sus partículas que el natural. De acuerdo a su densidad, tanto el agregado reciclado como el natural se pueden clasificar como ligeros, ya que una roca caliza normal tiene una densidad comprendida entre 2,5 y 2,8 (Neville, 1988). Además, la absorción fue mayor en el material natural, en consecuencia la relación agua/cemento no se incrementa en comparación con el material natural ya que el reciclado no absorbe una cantidad mayor de agua efectiva de la mezcla. Por último, ambos materiales aprobaron la prueba de degradación por abrasión e impacto pero con un saldo positivo a favor del material natural que obtuvo 35,70% de degradación, contra 43,40% del material reciclado, siendo 50% el máximo admisible según la norma en cuestión.

En cuanto al agregado fino (cuadro 3), el PVSS del reciclado fue mayor al natural con una diferencia de 61 kg/m³ (4,7%) mientras que la densidad fue menor por 0,19 kg/lt (9,1%). En el agregado fino la tendencia en cuanto a absorción se revirtió, obteniéndose una alta absorción del material reciclado con 14,03% contra 7,99% del natural, por lo tanto el material reciclado incrementa su necesidad de cantidad de cemento para mantener una misma relación agua/cemento debido a su alta

necesidad de agua en la mezcla. Tomando en consideración que el valor del módulo de finura es más alto mientras más grueso es el agregado, se observa que el agregado reciclado es mejor que el natural en este punto, con una diferencia de 0,29 (10,3%) del valor del módulo de finura, por lo tanto la cantidad de cemento utilizado en los agregados reciclados actuará mejor al contener menos partículas finas.

En las gráficas granulométricas del agregado grueso (gráficos 1 y 2) se puede observar que el material reciclado, en la malla n° 4 obtuvo un alto porcentaje de material que la traspasa (21%), rebasando el máximo especificado en la norma (15%), pero en las demás mallas se pudo observar un buen comportamiento granulométrico. El material natural presenta una mejor graduación ya que su gráfica se encuentra siempre dentro de los límites establecidos. Se hace la observación de que aun con las mismas condiciones de trituración el tamaño máximo de agregado obtenido fue diferente con 1 pulgada para el material natural y 3/4 de pulgada para el material reciclado.

Con respecto a la granulometría del material fino se puede observar en los gráficos 3 y 4 que ambos materiales sobrepasan el límite máximo (10%) en la malla n° 100, con 20% para el reciclado y 24% para el natural, lo que definitivamente es negativo para los concretos, sin embargo existe 4% a favor de los agregados reciclados. Otra pequeña desviación del agregado reciclado sucedió en la malla n° 8, donde la norma permite un mínimo de 80% y se obtuvo 77%, lo que no es significativo. En las demás mallas ambos materiales se comportaron dentro de los límites establecidos.

Cuadro 2

Características físicas del agregado grueso

Características de la muestra	Unidad	Material natural	Material reciclado
Peso volumétrico seco y suelto	kg/m ³	1.061,00	1.129,00
Peso volumétrico seco y compacto	kg/m ³	1.138,00	1.176,00
Densidad	kg/lt	2,03	1,99
Absorción	%	13,64	11,82
Abrasión	%	35,70	43,40

Cuadro 3

Características físicas del agregado fino

Características de la muestra	Unidad	Material natural	Material reciclado
Peso volumétrico promedio, seco y suelto	kg/m ³	1.245,00	1.306,00
Densidad	kg/lt	2,10	1,91
Absorción	%	7,99	14,03
Módulo de finura	—	2,53	2,82

La prueba para determinar las impurezas orgánicas de los agregados finos fue realizada utilizando el método visual basado en colorimetría (ASTM C40-04 y D1544-98), un método de apreciación, pero no hubo problema alguno al momento de hacer las observaciones. Como se ve en la foto 6 ninguno de los dos materiales mostró exceso de impurezas orgánicas, pero vale la pena señalar que el material reciclado resultó visiblemente más claro, lo que señala su mayor pureza en este rubro.

Los resultados de las pruebas químicas indicaron que el material es altamente calizo, ya que contiene 46,91% de óxido de calcio (CaO), que convertido a carbonato de calcio (CO₃Ca) representa cerca del 84%. En cuanto al porcentaje de iones de cloruro (Cl) es bastante bajo ya que tan sólo representa 3,5 gr. por kg de material. Sólo se obtuvieron álcalis en proporción de 0,23% sumando los óxidos de sodio y de potasio. Los sulfatos (SO₃), en proporción de con 0,69%, están dentro del límite máximo de 1% recomendado por la RILEM (RILEM, 1994).

Gráfico 1
Granulometría del agregado grueso natural

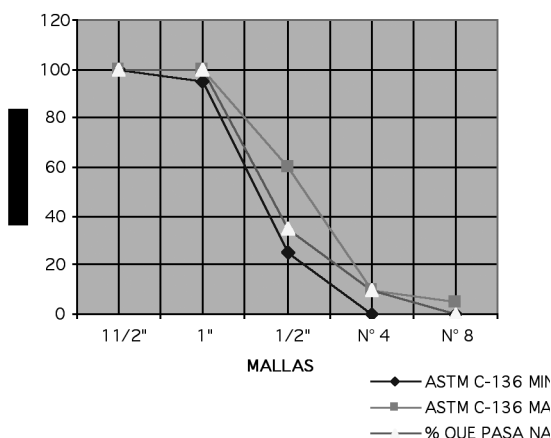


Gráfico 3
Granulometría del agregado fino natural

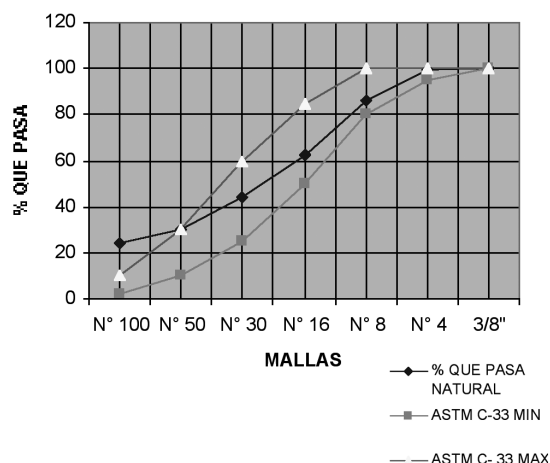


Gráfico 2
Granulometría del agregado grueso reciclado

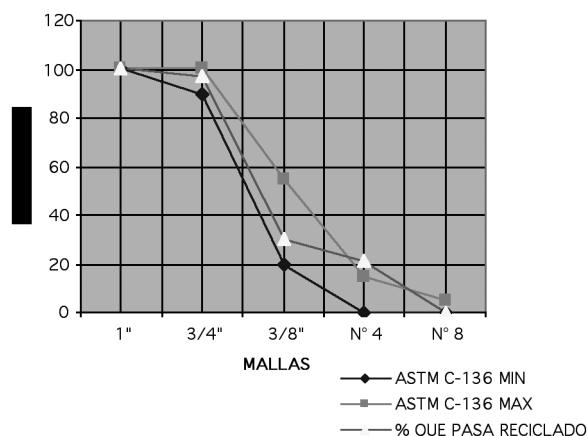
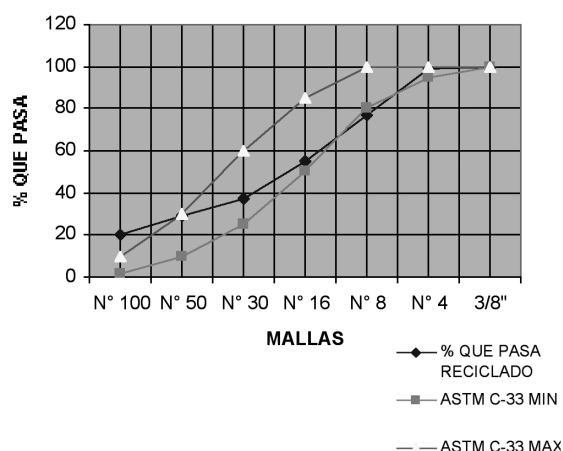


Gráfico 4
Granulometrías del agregado fino reciclado



Discusión

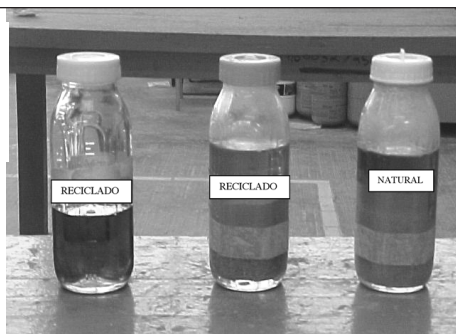
El estudio y uso de los agregados reciclados no es nuevo, pero su auge se ha venido incrementando notablemente en los últimos años debido a que el mundo ha comprendido su importancia económica y ecológica. En términos generales los investigadores —desde décadas pasadas (Malhotra, 1976; Buck, 1977; Nixon, 1979; Frondistou-Yannas, 1985) y hasta en años más recientes (Kasai, 1993; Barra, 1997; Gómez, 1999; Dal Molin, 2003)— coinciden en que las principales diferencias entre agregados reciclados y naturales son: por un lado, la mayor absorción de humedad por parte de los primeros, acentuándose en los agregados finos (14,03% en este estudio), lo cual se atribuye a la porosidad de la pasta de cemento que tiende a concentrarse en la parte fina; por otro lado, la densidad del agregado reciclado que es menor, pero las variantes de densidad no son tan marcadas como las que se tienen en absorción. En el presente trabajo se encontraron resultados coincidentes con estos. De hecho los autores han realizado trabajos más extensos con este tipo de agregados (Dominguez y Villanueva, 2000) en años anteriores y los resultados han sido muy similares.

En cuanto a la granulometría, se obtuvieron porcentajes muy altos en la fracción fina, en especial la que pasa la malla 100 (20%), lo que resulta perjudicial a la hora de fabricar concretos, sin embargo, cabe señalar que este porcentaje de finos fue aún mayor en el agregado natural que se utiliza regularmente en la zona (24%), problema que es conocido y han sabido solventar los constructores locales. De hecho la Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayos e Investigación sobre los Materiales y las Construcciones, en sus recomendaciones emitidas a través de su grupo de tarea (RILEM, 1994) reco-

noce que a los agregados finos reciclados se les pueden aplicar las especificaciones tradicionales, no así al agregado grueso, que condiciona en su porcentaje de participación en los concretos, debido a que en condiciones especiales de exposición y debido a su porosidad podrían afectar la durabilidad del concreto armado ya que la velocidad de carbonatación y de ingreso de cloruros puede ser mayor.

Otro punto a destacar es la materia prima utilizada. Mientras en los países desarrollados se insiste en fabricar concreto reciclado sólo a partir de residuos de concreto original, clasificando incluso otros materiales —como los morteros y tabiques— como contaminantes, en América Latina se hacen esfuerzos por reciclar materia prima más heterogénea. Debido al uso de materia prima heterogénea, además de medir el contenido de materia orgánica se realizaron análisis químicos a los agregados, con la finalidad de detectar sustancias o agentes nocivos como iones de cloruro, sulfatos, o álcalis. Se encontró que el material es altamente calizo, ya que contiene 46,91% de óxido de calcio (CaO), que convertido a carbonato de calcio (CO₃Ca) representa cerca de 84%. En cuanto al porcentaje de iones de cloruro (Cl), es bastante bajo ya que sólo representa 3,5 gr. por kg de material. Los álcalis tan solo se obtuvieron en 0,23% (0,11% de Na₂O y 0,12% de K₂O), el porcentaje de sulfatos (SO₃) se encuentra dentro del límite máximo de 1,0% recomendado (RILEM, 1994) con 0,69%. El RILEM, que es un organismo bastante respetable por sus estudios en este campo, recomienda continuar con estos estudios para ampliar y profundizar en el conocimiento de estos materiales, los cuales por su naturaleza son de características muy diversas de región en región y es así como cada país deberá hacer esfuerzos enfocados al uso de los materiales reciclados atendiendo a su realidad y necesidades particulares. De ahí la importancia del presen-

Foto 5
Contenido de impurezas orgánicas



Cuadro 4
Características químicas de los agregados reciclados

Ensayo	UM	Cantidad
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	%	5,64
Oxido de Calcio (CaO)	%	46,91
Oxido de Magnesio (MgO)	%	1,19
Trióxido de Azufre (SO ₃)	%	0,69
OXIDO DE SODIO (Na ₂ O)	%	0,11
Oxido de Potasio (K ₂ O)	%	0,12
Iones Cloruros (Cl)	%	0,035

te trabajo, que estudia los materiales resultantes del reciclaje de los residuos de una región específica de México, y atiende a su realidad tecnológica, cultural y económica al estudiar materia prima heterogénea y elementos que para otros países no revisten mayor importancia. Se deberá continuar con los estudios encaminados a medir la durabi-

lidad y estabilidad de las propiedades de los concretos y cualquier otro elemento fabricado con estos agregados, y el análisis de costos correspondiente para determinar de manera más aproximada la factibilidad técnica-económica de su utilización.

Notas

1 Se calculó este volumen de residuos con el doble objetivo de simular su industrialización y continuar el proyecto con la construcción de un módulo de vivienda escala 1:1 de 3,50m x 4,0 m con el material obtenido.

Referencias bibliográficas

- ASTM C29/C29M-97 (2003) Standard Test Method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate.
- ASTM C127-01. Standard Test Method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.
- ASTM C128-01e1. Standard Test Method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate.
- ASTM C33-03. Standard Specification for concrete aggregates.
- ASTM C131-03. Standard Test Method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.
- ASTM C136-01. Standard Test Method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- ASTM C40-04. Standard Test Method for organic impurities in fine aggregates for concrete.
- ASTM D1544-98. Standard Test Method for color of transparent liquids (gardner color scale).
- Barra, M. (1997) «Dosagem de concretos com agregados reciclados: Aspectos particulares», en: *Reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental*, ANAIS, 29 de abril de 1997. São Paulo, Brasil.
- Bossink, B. A. G. y Brouwers, H. J. H. (1996) «Construction Waste: Quantification and Source Evaluation», *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 122, nº 1, pp. 55-60, New York.
- Buck, A.D. (1977) «Recycled Concrete as a Source os Aggregate», *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 74, nº 5, pp. 212-219.
- Dal Molin, D. (2003) Durabilidad de Concretos Fabricados con Agregados Reciclados. VIIº Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción CONPAT 2003, ALCONPAT, septiembre de 2003. Yucatán, México.
- Dominguez, J. A. y Villanueva, V. (2000) «Caracterización de agregados producto de reciclaje de residuos de construcción y demolición», *Revista Avacient*, nº 27, año 10, pp. 11-22.
- Frondistou-Yannas, S.A. (1985) «Concreto reciclado como un nuevo agregado», *Revista IMCYC*, vol. 23, nº 175, pp. 53-70, México.
- Gómez, J. M. (1999) «Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto», *Revista Construcción y Tecnología del IMCYC*, vol. 15, nº 167, pp. 10-22.
- Kasai, Y. (1993) «Guidelines and the present state of the reuse of demolished concrete in Japan», en: Lauritzen, E. K. (ed.) *Demolition and reuse of concrete and masonry, guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry*.
- Malhotra, V. M. (1976) «Use of Recycled Concrete as a new Aggregate», Report 76-18, Canadian Center of Mineral and Energy Technology. Ottawa, Canada.
- Molina, J. M. (1997) «Recuperación de materiales de monstrucción», *Boletín CF+S Especial sobre Residuos*: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n2/lista.html>.
- Namakforoosh, N. M. (1993) *Metodología de la investigación*. Ed. Limusa, México.
- Neville, A. M. (1988) *Tecnología del concreto*, Tomo I. Ed. Limusa, México.
- Nixon, P. J. (1979) «Reciclaje de Concreto», *Revista IMCYC*, vol. 17, nº 102, pp. 35-44. México.
- Parra, A., "Estado del Arte del Reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición en España", Ponencia presentada en la *V Conferencia Científico-Técnica de la Construcción*, en La Habana, Cuba del 1 al 3 de abril de 2002.
- RILEM (1994) RILEM Recommendation 121-DRG Guidance for Demolition and reuse of Concrete and Masonry. Specifications for concrete with Recycled Aggregates. *Materials and Structures*, nº 27, pp. 557-559.