ISSN 2250-5989
ISSN-L 2250-5989

CIENCIA y TECNOLOGÍA de los MATERIALES

LABORATORIO DE ENTRENAMIENTO MULTIDISCIPLINARIO PARA LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

Revista N° 8 - 2018

LEMIT

LABORATORIO DE ENTRENAMIENTO MULTIDISCIPLINARIO PARA LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

• Hormigón de Cemento Portland

Estudios y análisis de materiales componentes del hormigón de cemento Portland: cementos, agregados, adición y aditivos
Alterabilidad de agregados frente a reacciones deletéreas
Estudios integrales de hormigones de peso normal y especiales (alta performance, con fibras, autocompactantes, livianos, etc.)

Sala de Hormigonado

• Durabilidad y vida útil de las estructuras

Corrosión de armaduras
Evaluación de estructuras con patologías
Ensayos destructivos y no destructivos

Equipo extractor de testigos con broca diamantada

Estudios sobre reacción álcali-agregado

• Ensayos físicos y análisis de fallas

Ensayos sobre metales y maderas
Ensayos sobre tubos y accesorios de PVC
Calificación de fusionistas en instalaciones de gas
Ensayos para la calificación de soldadores y procedimientos de soldaduras en materiales metálicos

Sala de Ensayos Mecánicos

Ensayo a tensión
Prensa INSTRON

• Pavimentos Flexibles

Cementos asfálticos y emulsiones bituminosas
Agregados pétreos: ensayos físico-mecánicos
Suelo-cemento, suelo-cal
Lechadas asfálticas
Clasificación de ligantes SUPERPAVE
Mezclas en frío y en caliente
Polímeros
Materiales de juntas

Equipo para determinar la viscosidad cinemática del asfalto.

• Fundición y Metalurgia

Fundición de precisión y especiales
Laboratorio metalográfico
Ensayos no destructivos en metales
Estatuaria

Fundición de piezas en diversos metales

• Otros materiales

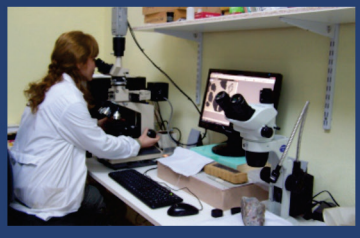
Materiales para edificios (cerámicos, tejas, chapas, baldosas, bloques, etc.)
Placas y paneles para viviendas
Caños de hormigón simple y armado

Estudios de materiales de valor patrimonial

• Geología, Mineralogía y Petrografía

Estudios mineralógicos y petrográficos
Cubicación de canteras de rocas y suelos

Microscopio petrográfico y lupa estereoscópica



• Control de calidad y certificación de materiales.

CIENCIA y TECNOLOGÍA de los MATERIALES

DIRECTOR
Dr. Ing. ZEGA, Claudio J.

COMITE EDITOR
Ing. DI MAIO, Ángel A.
Ing. GIACCIO, Graciela
Dr. Ing. GREGORUTTI, Ricardo
Dra. Ing. LOPEZ, Anahí
Ing. MARCOZZI, Rosana
Dr. Ing. MOREA, Francisco
Dra. Ing. TORRIJOS, María Celeste
Ing. TRAVERSA, Luis P.
Dra. ROSATO, Vilma G.
Dr. Ing. VILLAGRAN ZACCARDI, Yury A.
Dr. Ing. ZERBINO, Raúl L.

ÍNDICE

1.- Hormigones Reciclados: Investigaciones realizadas en el LEMIT durante los últimos 18 años. *A.A. Di Maio* **9**

2.- Reciclaje de los residuos de la construcción y demolición en Argentina. **21**
C. Altamira, M.E. Sosa, C. Zega

3.- Gestión de residuos de construcción y demolición. Análisis sistematizado de la normativa aplicado a la interrelación España – Argentina. *N. A. Valoni* **31**

4.- Agregados Reciclados de Hormgión. Comportamiento mecánico del hormigón reciclado. *C. Zega, M.E. Sosa, A.A. Di Maio* **39**

5.- Durabilidad de hormigones con agregados reciclados. *L.R. Santillána* **51**

6.- Morteros cementicios con residuos plásticos de PET y RAEE *L.Peisino, J.Kreiker,* **67**
R. Gaggino, J. Gonzalez Laria, M. Gómez, B. B. Raggiotti, M. Positieri, P. Uberman

Título:
Ciencia y Tecnología de los Materiales.

***Editor responsable*:**
LEMIT - 52 e/121 y 122. 1900 - La Plata. Buenos Aires. Argentina.

Diseño y diagramación:
Prof. Sebastian Marquez

Cantidad de ejemplares: 500

Las opiniones expresadas en los artículos de esta Revista son responsabilidad exclusiva de los autores. Se permite la reproducción total o parcial de los trabajos, siempre que no se altere su sentido y se anexe los datos bibliográficos completos de la Revista, el artículo y los nombres de sus autores.

The views in the articles of this Journal are the sole responsibility of the authors. Reproducing all or part of the papers is allowed, provided its meaning is not changed and added the complete bibliographic data of theJournal, the article and authors names.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durabilidad del Hormigón, Ligantes Hidráulicos y Adiciones Minerales
- Estudio de las reacciones Álcali-Sílice (RAS) y Álcali-Carbonato (RAC)
- Durabilidad de hormigones en suelos salinos
- Adiciones minerales activas (AMA) y aditivos químicos

Hormigones de Cemento Portland
- Estructura y mecanismos de rotura del hormigón
- Evaluación del hormigón con métodos Destructivos y No Destructivos
- Mecanismos de transporte en hormigón endurecido
- Hormigones especiales (Autocompactantes, Reciclados, Coloreados, Reforzados con Fibras)

Patologías y Reparación de Construcciones
- Corrosión de barras empotradas en el hormigón
- Biocorrosión del hormigón
- Relevamiento de estructuras de hormigón armado y vida en servicio
- Técnicas de restauración y conservación del patrimonio construido

Tecnología Vial
- Dosificación de mezclas asfálticas por el sistema SUPERPAVE
- Correlación entre Deformación Permanente y la Viscosidad a Corte Cero
- Medidas de Ahuellamiento y Daños por Humedad en Mezclas Asfálticas
- Grado de performance según Strategic Highway Research Program (SHRP)
- Asfaltos modificados con polímeros

Mineralogía, Petrografía y Sedimentología
- Estudios petrográficos y mineralógicos de rocas utilizadas en materiales de la construcción
- Investigaciones geológicas y geotecnológicas
- Paleomagnetismo y magnetismo de rocas
- Contaminantes metálicos en sedimentos

Procesos de Solidificación, Fundición y Soldadura
- Elaboración de aceros inoxidables Dúplex
- Fundición de hierro
- Métodos de moldeo
- Estatuaria
- Materiales para implantes quirúrgicos y prótesis
- Desarrollo de Noyería Cerámica y elaboración de Impulsores con Baja Rugosidad
- Estudio de Piezas Arqueológicas Pertenecientes al Patrimonio Nacional

ASESORAMIENTO Y SERVICIO TECNOLÓGICO

El LEMIT brinda asesoramiento y servicio tecnológico al sector productivo, en el ámbito público y privado, sobre los siguientes temas:

Rocas
- Ensayos físico-mecánicos
- Análisis petrográficos y mineralógicos
- Evaluación de canteras y yacimientos
- Hormigones de Cemento Portland

Cemento Portland
- Agua para mezclado
- Agregados para morteros y hormigones
- Adiciones minerales
- Estudios de dosificación de hormigones tradicionales y especiales
- Aditivos para hormigón
- Durabilidad del hormigón
- Reacción álcali-sílice (RAS)

Estructuras de Hormigón
- Extracción de testigos
- Evaluación mediante Ensayos destructivos y no destructivos
- Corrosión de armaduras
- Patologías de estructuras

Patrimonio Construido
- Estudios integrales
- Técnicas de reparación y conservación

Materiales de Construcción
- Cales hidráulicas y aéreas
- Yesos e hidrófugos
- Ladrillos
- Baldosas y losetas aglomeradas con cemento
- Azulejos y revestimientos
- Bloques huecos de morteros
- Bloques de hormigón para pavimentos
- Paneles

Fundiciones
- Estudios metalográficos
- Fundición de piezas

Suelos
- Clasificación de suelos
- Análisis granulométricos
- Ensayos de compactación
- Determinación de densidad “in-situ”
- Suelo-cal
- Suelo-cemento
- Estabilizado granulométrico
- Valor soporte

Materiales Bituminosos
- Betunes asfálticos
- Emulsiones bituminosas
- Selladores para juntas
- Membranas asfálticas
- Clasificación de asfaltos por grado de performance (PG de SHRP)

Mezclas Bituminosas para Pavimentos
- Agregados para mezclas bituminosas
- Proyectos de mezclas y tratamientos bituminosos
- Diseño de mezclas según SUPERPAVE (SHRP)
- Ensayos de ahuellamiento (WTT)
- Ensayo de Hamburgo (HWTT)

Ensayos Físico-Mecánicos
- Metales ferrosos y no ferrosos
- Maderas
- Plásticos
- Tubos y accesorios para agua y cloacas
- Barras para hormigón
- Cables para hormigón pretensazo
- Elementos de seguridad
- Caños y conexiones de mortero y hormigón

EDITORIAL

La revista Ciencia y Tecnología de los Materiales tiene como propósito favorecer la divulgación e intercambio con el medio científico y productivo de los estudios sobre distintos materiales que se desarrollan en el LEMIT. El lector podrá encontrar artículos que muestran los resultados obtenidos en diferentes líneas de investigación, o que surgen ante la necesidad de dar solución a problemáticas de aplicación específica.

Con motivo de la realización de la Jornada sobre Gestión y Valorización de Residuos de Construcción y Demolición, durante el mes de noviembre de 2018, en este número de Ciencia y Tecnología de los Materiales se incluyen seis trabajos correspondientes a algunas de las presentaciones realizadas en dicha jornada. En primer término se presenta una reseña sobre las investigaciones, actividades y formación de recursos humanos desarrollados en el LEMIT en el marco de los estudios vinculados a los hormigones reciclados. Luego se presentan dos trabajos vinculados con la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD), uno de ellos referido a la situación actual del tratamiento de los RCD en Argentina, estado normativo y perspectivas a futuro, mientras que en el otro se analiza el caso de España, haciendo una comparación con Argentina en lo referente a normativa, caracterización de residuos y gestión de los mismos. El cuarto trabajo sintetiza las diferentes propiedades de los agregados grueso y fino reciclados provenientes de hormigones de diferentes calidades, así como también sobre el comportamiento mecánico de los hormigones con ellos elaborados. A continuación se podrá encontrar una revisión bibliográfica sobre el desempeño durable de hormigones reciclados en distintos entornos agresivos. En último término, distanciado de los RCD pero vinculado con la temática del tratamiento de diferentes tipos de residuos, se incluye un trabajo sobre la incorporación de residuos plásticos a matrices cementiceas, particularmente de PET (tereftalato de polietileno) y RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos), con el fin de producir diferentes materiales y componentes de construcción.

La Plata, Noviembre de 2018.-

HORMIGONES RECICLADOS: INVESTIGACIONES REALIZADAS EN EL LEMIT DURANTE LOS ÚLTIMOS 18 AÑOS

RECYCLED CONCRETE: RESEARCHES CONDUCTED IN THE LEMIT DURING THE LAS 18 YEARS.

A.A. Di Maio[1]

[1] *Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), CICPBA. Calle 52 e/121 y 122. (1900) La Plata. Buenos Aires. Argentina. hormigones@lemit.gov.ar.*

RESUMEN

Debido al crecimiento poblacional en el mundo, lo cual conlleva a una demanda de nuevas estructuras e infraestructuras urbanas, el consumo de recursos naturales se ha visto sensiblemente afectado. En el caso particular de la industria de la construcción, este hecho es muy notorio debido a que por ejemplo en la fabricación de hormigones, tanto el agua como los agregados necesarios para su elaboración, son materias primas naturales no renovables, motivo por el cual es imperioso tomar los recaudos necesarios para que todos ellos puedan ser reciclados. De esta forma se lograría una industria más sustentable, ya que este hecho no sólo impacta sobre aspectos prácticos sino también abarca a los ambientales, políticos, económicos y sociales.

Este trabajo tiene como objetivo presentar de manera sintetizada las diferentes investigaciones que se vienen desarrollando en el LEMIT sobre esta temática desde el año 2000, tendientes a resolver en alguna medida lo indicado anteriormente. Dichas investigaciones están relacionadas con la elaboración de hormigones en los cuales parte del agregado natural es reemplazado por agregados obtenidos de la trituración de hormigones viejos o de desecho, comúnmente conocidos como "agregados reciclados". En tal sentido se evaluaron diferentes propiedades de estos agregados como así también las características físico-químicas, mecánicas y durables de los hormigones con ellos elaborados.

Los primeros estudios realizados tendieron a evaluar las diferentes propiedades de los agregados gruesos reciclados (AGR), pudiéndose determinar que los mismos presentan fundamentalmente una alta porosidad y absorción de agua como así también una baja densidad y una alta pérdida por abrasión en el ensayo de desgaste "Los Angeles", debido principalmente a que los mismos pueden estar conformados por piedra, piedra con mortero o en algunos casos simplemente por mortero. La generación de los agregados reciclados se realizó en algunos casos mediante la trituración de hormigones producidos en el laboratorio, es decir conociendo las características del hormigón de origen, mientras que en otros casos surgieron de hormigones cuya procedencia era desconocida. Este hecho permitió concluir que las características

del hormigón de origen tienen importancia sobre la calidad de los agregados reciclados obtenidos [1].

A partir de tomar conocimiento de las principales propiedades de los AGR, se comenzó con la realización de dosajes de mezclas de hormigón de diferentes niveles de resistencia, en las cuales parte del agregado grueso natural fue reemplazado por distintos porcentajes de AGR (25, 50, 75 y 100 %). Este hecho permitió evaluar el comportamiento de dichos hormigones en estado fresco y endurecido. Por otro lado se pudo determinar para qué porcentaje de reemplazo, las resistencias de los hormigones reciclados (HR) eran similares a las de los hormigones convencionales elaborados con agregados naturales (HC), pudiéndose establecer que hasta un 75% de reemplazo dichas resistencias son iguales. Simultáneamente se evaluó el módulo de elasticidad estático, parámetro de importancia para este tipo de material, principalmente por las características que poseen los agregados gruesos reciclados, determinándose que para cualquier porcentaje de reemplazo, el módulo es inferior al de los hormigones HC [2, 3]. Dichos resultados fueron verificados en estudios posteriores, en los cuales se analizó la variación que presentaban las propiedades de los AGR a partir de seleccionar diferentes muestras de un acopio de material reciclado que se renovaba continuamente. Los resultados surgieron de la realización de una Tesis de Maestría denominada "Hormigones Reciclados: Caracterización de los Agregados Gruesos Reciclados" [4], dando lugar a diferentes publicaciones [5,6]. En todos estos casos los agregados reciclados utilizados se obtuvieron de la trituración de hormigones de los cuales se desconocía su procedencia y calidad.

Además, los HR fueron evaluados mediante distintos Ensayos No Destructivos a fin de determinar las posibles modificaciones que se producen en cada uno de ellos respecto a hormigones convencionales elaborados con el mismo tipo de agregado grueso y nivel resistente. De los estudios realizados, se pudo observar que por ejemplo para un mismo nivel de resistencia a compresión, las velocidades del pulso ultrasónico de los HR son inferiores a las de los hormigones convencionales, hecho que está asociado principalmente a la menor densidad que poseen los HR [7,8].

Con el propósito de ampliar el conocimiento sobre las propiedades físicas y mecánicas de los AGR, y de los hormigones que con ellos se elaboran, se realizaron estudios empleando agregados reciclados producto de la trituración de hormigones elaborados con agregados gruesos naturales de diferentes procedencias y habitualmente empleados en nuestro país, los cuales poseen características mineralógicas diferenciadas. Este hecho permitió, por un lado, conocer la incidencia que tiene el tipo de agregado natural que contiene el hormigón de origen sobre diferentes propiedades de los AGR obtenidos a partir de los mismos, y por otro, determinar las ventajas y/o desventajas de cada uno de ellos cuando son empleados en la elaboración de nuevos hormigones, frente a distintas solicitaciones. Los diferentes resultados obtenidos fueron producto de la realización de una Tesis de Doctorado denominada "Propiedades Físico-Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados" [9], a partir de los cuales surgieron distintos trabajos [10,11] y un capítulo de libro [12].

En otros estudios realizados [13] se evaluó el comportamiento resistente de hormigones que fueron reciclados en forma sucesiva (hasta 5 reciclados) empleando un 75% de AGR, obtenido de la trituración de un hormigón convencional conocido, en reemplazo del agregado grueso natural. De los resultados obtenidos surge que la densidad de los agregados gruesos reciclados disminuye con los sucesivos ciclos de reciclado hasta un valor próximo a la del mortero. Este hecho se debe al porcentaje de agregado reciclado utilizado (75%) y a que los mismos presentan mayor cantidad de mortero en los sucesivos procesos de trituración. Además, la absorción de agua y la pérdida de peso en el desgaste "Los Angeles" se incrementan a lo largo de los sucesivos ciclos de reciclado, alcanzando un valor prácticamente

constante a partir del 3º ciclo de reciclado, hecho que también debe ser atribuido a la mayor cantidad de mortero existente. A pesar de la disminución en la calidad de los agregados a través de los sucesivos ciclos de reciclado, el comportamiento resistente de todos los hormigones reciclados fue similar al del hormigón original a partir del cual se obtuvieron los primeros agregados reciclados. Este comportamiento se debe fundamentalmente a que todos los hormigones fueron elaborados con la misma razón agua/cemento (0,50), hecho que estaría indicando que para los niveles de resistencia obtenidos la calidad del agregado grueso es despreciable. Por otro lado el módulo de elasticidad estático también disminuye con los sucesivos ciclos de reciclado debido a la menor rigidez que van adquiriendo los agregados en su continuo proceso de trituración.

Manteniendo la premisa de tratar de reutilizar materiales de desecho, se realizaron estudios consistentes en evaluar el comportamiento de HR elaborados empleando como agregado grueso hormigón triturado procedente de sobrantes de hormigón de mixer [14] los cuales son generalmente depositados en terrenos baldíos o bien en la propia planta hormigonera. En este caso se ejecutó un hormigón de características similares al elaborado en planta, pero realizando un reemplazo del agregado natural por 25, 50 y 75% en volumen de AGR. Considerando los buenos resultados obtenidos puede plantearse a esta alternativa como otra opción válida para la elaboración de nuevos hormigones, ya que se eliminaría a este material sobrante y se lograría disminuir la contaminación y la extracción de recursos naturales no renovables y reducir los costos en el hormigón.

Evaluadas las propiedades físico-mecánicas de los hormigones reciclados (HR) y teniendo como antecedente que a nivel internacional existía escasa información respecto al comportamiento durable de los mismos, además de existir discrepancias con relación al desempeño que pueden tener dichos hormigones frente a diferentes patologías o procesos de deterioro, tanto cuando se encuentran en ambientes agresivos como cuando se producen reacciones químicas con algunos de los componentes del hormigón, es que se iniciaron diferentes estudios tendientes a evaluar el comportamiento durable de los HR. Bajo esta temática se realizó, como fuera indicado anteriormente, una Tesis de Doctorado [9], hecho que permitió establecer el comportamiento de diferentes tipos de hormigones reciclados respecto a dicha propiedad.

Se realizaron estudios en los cuales el comportamiento durable de diferentes tipos de HR fue comparado con hormigones convencionales de similares características tecnológicas frente al ingreso de cloruros, ataque por sulfatos, congelación y deshielo, reacción álcali-sílice y exposición a altas temperaturas.

Con relación al comportamiento de los HR frente al ingreso de cloruros y su capacidad de retención, se realizaron diferentes estudios en los cuales los hormigones fueron expuestos tanto a ambientes marinos naturales como así también inmersos en una solución de NaCl con una concentración de 30 g/l. Estos estudios contemplan la evaluación de hormigones convencionales y reciclados de diferentes características tecnológicas y niveles de resistencia a compresión, elaborados con distintos tipos y contenidos de AGR. Se analizaron los perfiles de ingreso de cloruros totales y solubles en agua, permitiendo determinar la capacidad de retención de cloruros de los distintos hormigones, vinculándolos también en algunos casos con la corrosión de las armaduras embebidas en el interior de las probetas. Como resultado de los estudios vinculados con el ingreso de cloruro surgieron distintos trabajos, algunos de los cuales fueron presentados en congresos nacionales e internacionales, y otros forman parte de publicaciones en revistas científicas de la especialidad [15-26].

Otro aspecto relacionado con la durabilidad de los HR se refiere al comportamiento de los mismos cuando son expuestos a suelos con sulfatos. Estos

estudios se encuentran aún en ejecución, debido a que las condiciones de exposición buscan replicar de algún modo las condiciones reales en que pueden encontrarse las estructuras de hormigón, hecho que conduce a que los tiempos de evaluación sean largos. Se evalúan hormigones de distintas características tecnológicas y con diferentes porcentajes de AGR (0, 25, 50, 75 y 100%), los que se expusieron en un suelo con alto contenido de sulfato de sodio, lo que representa un ambiente con un grado de ataque fuerte según el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201:2005). Algunos de estos hormigones permanecen en dicha condición luego de más de 10 años. Los prismas de hormigón, luego del curado normalizado, son colocados semi-enterrados según su eje longitudinal en el suelo con sulfato. Dichas muestras son evaluadas periódicamente mediante una inspección visual, pesado y determinación de la frecuencia de resonancia, parámetro éste que permite calcular el módulo de elasticidad dinámico y realizar el seguimiento del comportamiento de los hormigones en el tiempo. Los resultados parciales obtenidos hasta el momento muestran que los hormigones reciclados, para los distintos contenidos de AGR empleados, presentan un comportamiento semejante al de los hormigones convencionales de similares características tecnológicas [27,28].

Vinculado también con el ataque por sulfato en hormigones reciclados, se llevaron adelante estudios tendientes a determinar la potencialidad de reacción de los agregados reciclados al estar inmersos en una nueva matriz cementícea. Dichos estudios se enmarcan dentro de un proyecto de investigación en ejecución subvencionado por la ANPCyT. Se elaboraron morteros con diferentes tipos de cementos (distinto contenido de C_3A) a partir de emplear un agregado fino reciclado en distintas proporciones. Se moldearon prismas que fueron expuestos bajo dos condiciones: inmersos en solución de sulfato de sodio o completamente enterrados en suelo con alto contenido de sulfato. La evolución de las muestras se realizó periódicamente mediante inspección visual, registro de peso y medición de las expansiones. Los resultados obtenidos en estos estudios surgieron de una Tesis de Doctorado en ejecución [29], algunos de los cuales forman parte de trabajos presentados en congresos internacionales de la especialidad, posibilitando además la participación en el workshop final del Comite Técnico sobre sulfatos de RILEM, TC-251-SRT External sulfate attack - Field Aspects and Lab Tests [30-32].

Debido a que una de las características particulares que presentan los HR está dada por la alta absorción que poseen los agregados reciclados, como ya fue comentado, es que se estudió el comportamiento que pueden tener cuando son expuestos a ambientes con bajas temperaturas, principalmente cuando se producen ciclos alternados de congelación y deshielo. En tal sentido y considerando lo planteado en el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201-2005), se realizaron algunos estudios en los cuales se comparó el comportamiento de hormigones convencionales con aquellos elaborados con distintos porcentajes de reemplazo de AGR, los que fueron sometidos a 300 ciclos de congelamiento y deshielo, obteniéndose resultados altamente satisfactorios [33,34].

Continuando con los estudios relacionados con la durabilidad de los HR, otra de las temáticas abordadas es la referida a la reacción álcali-sílice (RAS). Al respecto debe mencionarse que la misma constituye un punto singular debido a que ha sido escasamente estudiada, hecho que ha llevado a restringir en algunas normativas el empleo de agregados reciclados que provengan de la trituración de hormigones afectados por dicha reacción. Los estudios, que se encuentran en ejecución y forman parte de un proyecto de investigación subsidiado por la ANPCyT, tienen por finalidad evaluar la capacidad remanente de reacción frente a los álcalis de los agregados reciclados, tanto grueso como fino, al ser obtenidos de un hormigón deteriorado por la RAS. Se evalúan hormigones elaborados con 20 y 50% (en volumen) de AGR en comparación

con el hormigón convencional elaborado con agregado grueso natural reactivo. Se analizan las expansiones registradas, tanto en probetas expuestas a las condiciones de la Norma IRAM 1700 como en probetas gemelas mantenidas en cámara húmeda. Los resultados parciales obtenidos en estos estudios forman parte de un trabajo presentado en un congreso de tecnología del hormigón [35].

Otra temática o aspecto estudiado de los HR, se refiere a la evaluación del comportamiento de dichos hormigones cuando son expuestos a altas temperaturas. Los estudios contemplaron la evaluación de hormigones convencionales y reciclados elaborados con tres tipos diferentes de agregados gruesos naturales, tres niveles resistentes y distintos porcentajes de reemplazo, cuando son expuestos a temperaturas de 500ºC durante 1 y 4 horas y enfriados al aire. El comportamiento de las probetas expuestas al proceso de calentamiento fueron comparados con probetas gemelas que permanecieron a temperatura ambiente. También se han evaluado hormigones reciclados elaborados con dos contenidos de agregado fino reciclado al ser expuestos a similares condiciones. En cada caso se trató de establecer si el daño interno que se produce bajo dicha condición de exposición es similar al de los hormigones convencionales y en qué magnitud se producen dichas afectaciones, ya que como es conocido se generan patologías internas tales como micro y macro fisuras que debilitan al material. Estos estudios fueron publicados en revistas científicas o presentados en congresos y workshops de la especialidad [36-38].

De las diferentes investigaciones realizadas sobre las propiedades durables de los hormigones reciclados, surgió la redacción de un capítulo de libro [39] en el cual se informan los resultados alcanzados hasta ese momento.

Otros estudios realizados que merecen mencionarse se refieren a la influencia del estado higrométrico de los AGR sobre las propiedades de los HR tanto en estado fresco como endurecido. Se ejecutaron hormigones de diferentes razones a/c y con distintos porcentajes de AGR (50 y 100%), los cuales al momento de ser utilizados poseían diferentes estados higrométricos (completamente secos o saturados a superficie seca); en el caso del empleo de los agregados secos, se utilizaron dos metodologías diferentes para compensar la pérdida de trabajabilidad de las mezclas como consecuencia de la alta absorción de los AGR: adicionar al agua de mezclado una cantidad equivalente al 50% de la absorción del agregado, y emplear un aditivo plastificante. Con los diferentes hormigones en estudio se moldearon prototipos de laboratorio (tipo columnas), los cuales fueron evaluados mediante el ensayo de ultrasonido y luego se extrajeron testigos para la determinación de la resistencia a compresión y parámetros de succión capilar. Los resultados obtenidos en los testigos fueron comparados con los determinados sobre probetas moldeadas al momento de llenar los prototipos [40].

Debido a que existía muy poco conocimiento respecto a la utilización del agregado fino reciclado (AFR) que surge durante el proceso de trituración de hormigones, hecho que ha llevado a que en algunas recomendaciones existentes a nivel internacional se prohíba su utilización, es que se iniciaron investigaciones relacionadas con la evaluación de diferentes propiedades de dichos AFR, estudiando no solamente al material en sí, sino fundamentalmente las variables que pueden producirse cuando se los utiliza en la elaboración de morteros y hormigones tanto en estado fresco como endurecido.

En este caso se siguió la metodología empleada para la evaluación de los AGR, ya que en principio se comenzó con la determinación de diferentes propiedades de los AFR, realizándose en algunos casos la comparación tanto con los agregados finos naturales de río (AFN) como así también respecto a los agregados finos procedentes de la trituración de rocas (AFNT) [41-44]. Posteriormente se comenzó con la elaboración de morteros en los cuales se emplearon diferentes porcentajes de

AFR, determinándose el comportamiento en estado fresco y endurecido [45-47]. A partir de los resultados obtenidos se tomó conocimiento de las características que adquirían las matrices que luego serían utilizadas en la elaboración de hormigones.

Los estudios realizados sobre hormigones tuvieron como principal objetivo evaluar diferentes propiedades de los mismos (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, contracción por secado, absorción de agua, succión capilar y penetración de agua a presión) al emplear el AFR como sustituto de un agregado fino granítico de trituración, utilizando ambos agregados en un 20 y 40% del total del agregado fino. A partir de estos estudios surgieron diferentes trabajos que fueron presentados en congresos nacionales e internacionales, y otros publicados en revistas científicas de la especialidad [48-51].

Debe mencionarse que a partir de los resultados obtenidos en los distintos estudios realizados, se participó en la redacción de un Capítulo de Libro "Use of Fine Fraction" correspondiente al reporte final del Comité Técnico 217 de RILEM [52].

Con relación a la contracción por secado de los HR, dicha temática dio origen a la realización de una Tesis Doctoral "Estudio de la contracción por secado en morteros y hormigones elaborados con agregados finos reciclados" [53], en la que se evaluaron mezclas convencionales y recicladas de distintos niveles de resistencia, empleando dos tipos diferentes de agregados naturales (granítico y cuarcítico), tanto del grueso como del fino. En las mezclas recicladas se emplearon AFR procedentes de la trituración de hormigones elaborados con cada uno de dichos agregados naturales.

Otras investigaciones llevadas a cabo sobre esta temática y basadas en que muchos investigadores plantean que la utilización de dichos agregados cuando posean partículas menores a 2 mm son perjudiciales para la elaboración de hormigones, se plantearon estudios en los cuales se evalúa la capacidad cementícea y el efecto filler de las fracciones consideradas como polvo del AFR. Por tal motivo se evaluaron las fracciones menores a 600 μm y 75 μm mediante la resistencia al índice de actividad (RIA), evaluándose el mortero tanto en estado fresco como endurecido por medio de propiedades como la consistencia, peso unitario, densidad y absorción de agua. Adicionalmente se realizaron análisis petrográficos mediante microscopía en cortes delgados. La fracción menor a 600 μm fue molida mediante un molino de bolas mientras que a la fracción de 75 μm no se le realizó ningún tratamiento. A estos materiales, como así también al cemento portland utilizado, se les determinaron la densidad y la finura Blaine. La distribución del tamaño medio de las partículas se determinó mediante difractometría láser, mientras que para la determinación de los componentes se empleó difracción por Rayos X [54,55].

Debe mencionarse que esta línea de investigación sobre diferentes aspectos de los HR, que aun está en vigencia, se ha transformado en una de las más destacadas del LEMIT, siendo pionera en nuestro país y la que ha permitido aportar nuevos conocimientos a la Tecnología del Hormigón mediante la difusión no solamente de los trabajos publicados en revistas tanto a nivel nacional como internacional, sino además en congresos de la especialidad y en conferencias y workshops realizados en nuestro país y en el extranjero. En tal sentido deben señalarse las jornadas y workshop llevados a cabo en el LEMIT [56,57,58,59] en los cuales se expusieron los resultados alcanzados hasta cada evento pero que además sirvieron para realizar intercambio de opiniones respecto a los distintos aspectos abordados sobre la temática.

Por otra parte, debido a que en nuestro país no existía ninguna normativa o recomendación relacionada con el empleo de agregados reciclados procedentes de la trituración de hormigones de desecho para la elaboración de nuevos hormigones, es que desde que se inició esta línea de investigación siempre se tuvo como objetivo poder llegar a la normalización de dichos materiales. Recién en el año 2016 y

luego de participar activamente en el Sub-Comité de Agregados del IRAM, se logró la incorporación en la Norma IRAM 1531: Agregado grueso para hormigón de cemento pórtland, la utilización de Agregados Gruesos Reciclados procedentes de la trituración de hormigones de desecho, limitándose su empleo en hasta un 20%. Respecto al porcentaje indicado lo consideramos, de acuerdo a nuestra experiencia, demasiado conservativo, aunque de todos modos marca el principio de una nueva tendencia en nuestro país para la aplicación de estos materiales.

Dado que los Hormigones Reciclados (HR) pueden actualmente ser diseñados con un nivel resistente semejante al de los hormigones convencionales, es que en muchos países existen normativas y/o recomendaciones para su utilización. Sin embargo, no existe aún un consenso definido con respecto al desempeño durable, por lo cual su uso en ambientes agresivos es en general evitado. Una economía circular requiere que el HR pueda ser diseñado para cualquier ambiente de exposición y ese es el principal objetivo que se ha planteado en las investigaciones llevadas a cabo. Lo indicado servirá además como uno de los aportes que puede realizarse desde la tecnología a fin de concientizar respecto a tener un mayor cuidado y/o protección de las materias primas no renovables, hecho que favorece también a la sustentabilidad y ecología.

Por último es deseable que a corto plazo pueda llegarse a la redacción de una normativa sobre hormigones elaborados con agregados procedentes de la trituración de hormigones de desecho, ya que existe información suficiente sobre las propiedades de los mismos tanto en estado fresco como endurecido. Además, sería importante incorporar a estos hormigones en el Reglamento CIRSOC 201:2005, ya que como es de público conocimiento en nuestro país distintas plantas de hormigón elaborado los vienen comercializando para la ejecución de diferentes tipos de elementos estructurales.

Los estudios anteriormente mencionados fueron realizados en el marco de diferentes Subsidios a Proyectos de investigación, otorgados por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) y por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

A continuación se indican algunos de los trabajos realizados y publicados, los cuales son referenciados en el presente informe.

Referencias

1.- A.A. Di Maio, F. Gutiérrez, L. Traversa (2001) “Comportamiento físico mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados”. 14ª Reunión Técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Tomo II. Olavarría, pp. 37-44.

2.- A.A. Di Maio, G. Giaccio, R. Zerbino (2002) “Hormigones con agregados reciclados”. Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, N°9, pp. 5-10.

3.- A.A. Di Maio, G. Giaccio, R. Zerbino (2003) “Hormigón con agregados reciclados: Resistencia, módulo de elasticidad y fluencia bajo cargas de compresión”. Revista Hormigón, N° 40, pp. 37-50.

4.- C.J. Zega (2008) “Hormigones Reciclados: Caracterización de los Agregados Gruesos Reciclados”, Tesis presentada para el grado de Magister en Tecnología y Construcciones de Hormigón, Facultad de Ingeniería, UNCPBA.

5.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2003) "Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones". XV Reunión Técnica y Seminario de Hormigones Especiales, AATH, Santa Fe. Ed. en CD.

6.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2007) "Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón". Technical Bulletin IMME, Vol. 45, Nº 2, pp. 1-11.

7.- A.A. Di Maio, L.P. Traversa (2003) "Evaluation of recycled concrete by means of non destructive tests". Revista Materiales de Construcción, IETCC, Nºs 271-272, Vol. 53, pp. 37-46.

8.- A.A. Di Maio, C.J. Zega, L.P. Traversa (2005) "Estimation of Compressive Strength of Recycled Concretes with the Ultrasonic Method". Journal of ASTM International, Vol. 2, Nº 5. Paper ID JAI12849. www.astm.org

9.- C.J. Zega (2010) "Propiedades Físico-Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados", Tesis presentada para el grado de Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNLP.

10.- C.J. Zega, Y. Villagrán Zaccardi, A.A. Di Maio (2010) "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical characteristics of recycled coarse aggregates". Materials and Structures, RILEM, Vol.43, Issue 1, pp. 195-202.

11.- C.J. Zega, A.A. Di Maio, R.L. Zerbino (2014) "Influence of natural coarse aggregate type on the transport properties of recycled Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 26, Nº6, pp. 04014006-1/04014006-9.

12.- O.A. Cabrera, C.J. Zega, Á.A. Di Maio, J.D. Sota (2012) "Agregados" (Capítulo 5). Em: "Ese Material llamado Hormigón". Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. ISBN: 978-987-21660-5-2. Editado por: Noemí Maldonado y Fernanda Carrasco. pp.103-162.

13.- C.J. Zega, V.L. Taus, Y.A. Villagrán Z., A.A. Di Maio (2005) "Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos". fib Symposium "Structural concrete and Time", Vol. 2, ISBN 978-987-21660-1-3. La Plata, Argentina, pp. 761-768.

14.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2001) "Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate". Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 23, Issue 3, pp. 281-286.

15.- A.A. Di Maio, L.P. Traversa (2002) "Difusión de cloruros en hormigones reciclados". Revista "Ciencia y Tecnología del Hormigón", LEMIT, N°9, pp.11-14.

16.- A.A. Di Maio, C. Zega, V. Taus, L. P. Traversa (2004) "Durability of recycled concretes". Proc. XV Edition of Congress "Comportarea in situ a constructiilor", Bucarest, Rumania, pp. 31-37.

17.- Y.A. Villagrán Z., V.L. Taus, C.J. Zega, A.A. Di Maio, L.P. Traversa (2005) "Propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados y su influencia en la corrosión de armaduras". fib Symposium "Structural concrete and Time", Vol.1, ISBN 978-987-21660-1-3. La Plata, Argentina, pp. 91-98.

18.- Y.A. Villagrán Zaccardi, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2008) "Chloride penetration and binding in recycled concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 20, Issue 6, pp. 449-455.

19.- Y.A. Villagrán, C.J. Zega, S.S. Zicarelli, A.A. Di Maio (2008) "Corrosión de hormigón reciclado armado en ambiente marino". Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, N°15, pp. 7-18.

20.- Y.A. Villagrán Zaccardi, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2009) "Hormigón con agregado reciclado proveniente de ambiente marino: ingreso de cloruro y corrosión de armaduras". Revista Hormigón, Nº 47, pp. 35-43.

21.- C.J. Zega, Y.A. Villagrán Zaccardi, A.A. Di Maio (2012) "Chloride Diffusion in Blended Cement Concrete made with Quartzite Recycled Aggregate". Materials Research Society Symposium, Vol.1488, pp. 62-67. Cancún, México. ISSN: 0272-9172.

22.- Y.A. Villagrán Zaccardi, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2012) "Influencia del ión sulfato en la retención de cloruro en hormigón reciclado con aire incorporado". VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras (CINPAR 2012). La Plata, Argentina. Ed. en CD.

23.- C.J. Zega, Y.A. Villagrán-Zaccardi, A.A. Di Maio (2015) "Chloride diffusion in recycled concretes made with different type of natural coarse Aggregate". Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible (Sustain Concrete 2015). Auspiciado por RILEM – ACI. Editado en Pendrive. pp. 393-402. ISBN 978-987-3838-02-6.

24.- Y.A. Villagrán-Zaccardi, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2016) "Chloride ingress and binding in air-entrained recycled aggregate concrete". Proc. of the 6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials Lat-Rilem Conference, Cali, Colombia, pp. 815-822. Ed: Lat-RILEM. www.rilem.org

25.- Y.A. Villagrán-Zaccardi, C.J. Zega, M.E. Sosa, L.R. Santillán, A.A. Di Maio (2016) "Durable performance of recycled aggregate concrete". Proc. of the 6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials Lat-Rilem Conference, Cali, Colombia, pp. 1014-1023. Ed: Lat-RILEM. www.rilem.org

26.- C.J. Zega, L.R. Santillán, Y.A. Villagrán Zaccardi, M.E. Sosa, A.A. Di Maio (2017) "Durable performance of recycled aggregate concrete in aggressive environments". Workshop Internacional Lat-RILEM sobre Áridos Reciclados, Varadero, Cuba.

27.- C.J. Zega y A.A. Di Maio (2012) "Durabilidad de Hormigones Reciclados en Suelo con Sulfato". VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras (CINPAR 2012). La Plata, Argentina. Ed. en CD.

28.- C.J. Zega, G.S. Coelho Dos Santos, Y.A. Villagrán-Zaccardi, A.A. Di Maio (2016) "Performance of recycled concretes exposed to sulphate soil for 10 years". Construction and Building Materials, 102, pp. 714-721. DOI 10.1016/j.conbuildmat. 2015.11.025

29.- L.R. Santillán "Durabilidad de hormigones reciclados frente al ataque químico". Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNLP. (En ejecución).

30.- L.R. Santillan, C.J. Zega, Y.A. Villagrán Zaccardi, L.E. Carrizo (2018) "Incidencia del agregado reciclado en barras de mortero expuestas a solución de sulfato". VIII Congreso Internacional - 22º Reunión Técnica de la AATH "En el centenario del primer despacho de cemento portland", Olavarría, Argentina, pp. 195-201.

31.- L.R. Santillán, Y.A. Villagrán Zaccardi, C.J. Zega (2018) "Assessment of the influence of recycled concrete aggregate on the resistance to external sulfate attack by accelerated testing of mortar bars". Proc. 72nd RILEMWEEK 2018 & SLD4 The 4th International Conference on Service Life Design for Infrastructures. Delft, Netherlands, pp. 793-802. e-ISBN: 978-2-35158-213-8.

32.- L.R. Santillán, Y.A. Villagrán Zaccardi, C.J. Zega (2018) "External sulphate attack on recycled concrete: assessment of the influence of recycled aggregate". Final Workshop of RILEM TC-251-SRT: External sulfate attack - Field Aspects and Lab Tests. Madrid, España.

33.- C. Zega, G. Fornasier, M. Ponce, A.A. Di Maio (2004) "Hormigones reciclados expuestos a ciclos rápidos de congelación y deshielo". Revista Hormigón, Nº 41, pp. 53-61.

34.- C.J. Zega, V.L. Taus, A.A. Di Maio (2006) "Effect of entrained air on recycled concrete properties". Journal of ASTM International, Vol. 3, Nº 10, Available online at www.astm.org

35.- C.J. Zega, D.D. Falcone, A.A. Di Maio (2016) "Desarrollo de la reacción álcali-sílice en hormigones con agregados reciclados". Proc. VIIII Congreso Internacional- 21ª Reunión Técnica de la AATH "Ing. Nélida del Valle Castría" Salta, Argentina, pp. 365-372.

36.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2006) "Recycled concrete exposed to high temperatures. Magazine of Concrete Research, Vol. 58, Nº 10, pp. 675-682.

37.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2009) "Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature". Construction and Building Materials, Vol.23, Issue 5, pp. 2047-2052.

38.- C.J. Zega, M.E. Sosa, A.A. Di Maio (2015) "Recycled fine aggregate concretes exposed to high temperature". Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible. (Sustain Concrete 2015). Auspiciado por RILEM – ACI. Editado en Pendrive. pp. 280-289. ISBN 978-987-3838-02-6.

39.- A.A. Di Maio, C. Zega (2012) "Durabilidad de hormigones reciclados". "Durabilidad de las Estructuras de Hormigón Armado". Anales LEMIT. Serie III, Año 1-Nº 2. ISBN: 978-987-26159-2-5. Editor: Luis P. Traversa. pp. 107-117.

40.- C.J. Zega, G.S. Coelho Dos Santos, A. Pittori, A.A. Di Maio (2014) "Efecto del contenido de humedad del agregado grueso reciclado sobre la resistencia a compresión". VI Congreso Internacional y 20º Reunión Técnica AATH "Ing. Alberto S.C. Fava", Concordia, Entre Ríos, Argentina, pp. 469-476. ISBN 978-987-21660-7-6.

41.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2006) "Comportamiento de hormigones elaborados con agregado fino reciclado". Proc. 16ª Reunión Técnica AATH, Mendoza, Argentina, pp. 47-54.

42.- C. Zega, M.E. Sosa, A. Di Maio (2010) "Propiedades de los agregados finos reciclados procedentes de hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados gruesos naturales". I Congreso Hormigón Premezclado de las Américas 2010. XII Congreso Iberoamericano del hormigón premezclado y IV Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, Mar del Plata, Argentina, pp. 33-38.

43.- M. Sosa, A. Di Maio, C.J. Zega (2013) "Caracterización de agregados finos reciclados de distintas procedencias". Revista Hormigonar, Año 9, Nº 29, pp. 20-24.

44.- M.E. Sosa, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2012) "Propiedades de agregados obtenidos por combinación de arena de río con agregados finos reciclados". Revista Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT, N°1, pp. 29-35.

45.- M.E. Sosa, C.J. Zega, A.A. Di Maio, J.P. Peralta (2012) "Evaluación de morteros con agregado fino reciclado en reemplazo de arena natural de Trituración". V Congreso Internacional y 19a. Reunión Técnica AATH, Bahía Blanca, Argentina, pp. 415-422.

46.- M.E. Sosa, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2014) "Influencia del origen del agregado fino reciclado sobre las propiedades de morteros". VI Congreso Internacional y 20º Reunión Técnica AATH "Ing. Alberto S.C. Fava", Concordia, Entre Ríos, Argentina, pp. 565-572.

47.- M.E. Sosa, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2015) "Morteros elaborados con agregado fino reciclado con diferentes condiciones de humedad". Revista Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT, N°5, pp. 61-69.

48.- C.J. Zega, A.A. Di Maio (2011) "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements". Waste Management, 31, pp. 2336-2340.

49.- C.J. Zega, M.E. Sosa, A.A. Di Maio (2015) "Transport properties of recycled fine aggregate concretes". XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components (XIII DBMC), Eds: Marco Quattrone, Vanderley M. John, Brazil, pp. 1065-1072.

50.- L.R. Santillán, M.E. Sosa, C.J. Zega, Y.A. Villagrán-Zaccardi, A.H. Chirillano (2014) "Influencia del agregado reciclado y otros agregados de trituración en la contracción por secado de morteros". Memorias VI Congreso Internacional y 20º Reunión Técnica de la AATH, Concordia (ER), pp. 549-556. ISBN 978-987-21660-7-6.

51.- M.E. Sosa, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2015) "Influence of fine recycled aggregate on compressive strength, static modulus of elasticity and drying shrinkage of concretes". Memorias Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible, La Plata, Argentina, pp. 311-319. ISBN 978-987-3838-02-6.

52.- I. Martins, A. Müller, A. Di Maio, J. Forth, J. Kropp, S. Angulo, V. John (2013) "Use of Fine Fraction". "Progress of Recycling in the Built Environment". Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE. Series: RILEM State-of-the-Art Reports, Vol. 8. ISBN: 978-94-007-4908-5. Editor: Enric, Vázquez. Publisher: Springer Netherlands. pp. 195-227.

53.- M.E Sosa (2018) "Estudio de la contracción por secado en morteros y hormigones elaborados con agregados finos reciclados". Tesis presentada para el grado de Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNLP.

54.- M.E. Sosa, C.J. Zega, G. Coelho Dos Santos, A.A. Di Maio (2015) "Use of fine recycled aggregate as supplementary cementitious material". III Progress of Recycling in the Built Environment, Sao Paulo, Brazil, pp. 73-79. Ed: Lat-RILEM. www.rilem.org

55.- M.E. Sosa, A. Lamnek, Y.A. Villagrán, D.E. Benito, C.J. Zega, A.A. Di Maio (2016) "Composición y propiedades del agregado fino reciclado en función del tamaño de partícula". Proc. VIIII Congreso Internacional- 21ª Reunión Técnica de la AATH "Ing. Nélida del Valle Castría", Salta, Argentina, pp. 627-633.

56.- Jornada Técnica "Hormigones Reciclados". LEMIT. 27 Oct. 2006.

57.- Jornada Técnica "Nuevos Materiales: Empleo de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Residuos de Proceso (RP)". LEMIT. 27 Nov. 2009.

58.- Workshop correspondiente a la Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible (Sustain Concrete) sobre el tema "Hormigones Reciclados". LEMIT. 15 Sep. 2015.

59.- Jornada sobre Gestión y Valorización de Residuos de Construcción y Demolición. LEMIT. 16 Nov. 2018.

RECICLAJE DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN ARGENTINA

RECYCLING OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES IN ARGENTINA

C. Altamira[1], M.E. Sosa[1], C. Zega[2,3]

[1] LEMAC, Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata ingmesosa@gmail.com
[2]Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), CICPBA. Calle 52 e/121 y 122. (1900) La Plata. Buenos Aires. Argentina. hormigones@lemit.gov.ar.
[3]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

RESUMEN

La creciente conciencia medioambiental y los cada vez más escasos recursos naturales obligan a la migración de una economía lineal, basada en generar, consumir y descartar, a una circular donde los desechos pasen a integrar parte de la materia prima necesaria para los procesos de generación. Los esfuerzos en materia ambiental no resultan suficientes para mitigar el daño al ecosistema. Resulta necesario entonces un compromiso conjunto para abordar la temática entre todos los sectores involucrados. En particular los residuos de la construcción y demolición (RCD) han demostrado un gran potencial de reutilización en países con políticas claras y eficientes. Esto no sólo contribuye a mitigar el impacto ambiental de la industria de la construcción, sino que una gran cantidad de países han generado una economía secundaria al crear cooperativas que se ocupan de la clasificación y comercialización de los RCD. En nuestro país hay un fuerte vacío legal sobre la temática, no se disponen de estadísticas y los esfuerzos realizados son aislados. Es tiempo de tomar conciencia de la necesidad de realizar un uso inteligente de los recursos disponibles. Un análisis de la situación actual en Argentina respecto del tratamiento de los RCD desde el punto de vista normativo, ejemplos de la actividad (casos de estudios) y perspectivas a futuro de la gestión y valorización de los RCD son incluidos en este trabajo.

Palabras clave: *Residuos de la construcción y demolición, reciclaje, medio ambiente*

ABSTRACT

The growing environmental awareness and the increasingly scarce natural resources become neediness the migration of a linear economy, based on generating, consuming and discarding, to a circular one where the waste integrate part of the raw material necessary for the generation processes. Efforts in environmental matters are not enough to mitigate the ecosystem damage. Therefore, it is necessary the compromise among all the sectors involved. In particular, in countries with clear and efficient environmental policies, construction and demolition waste (C&DW) has shown great potential for its reuse. This helps to mitigate the environmental impact of the construction industry, but a large number of countries have generated a secondary economy by creating cooperatives that deal with the classification and commercialization of the C&DWs. In our country there is no legislation on the subject, statistics are not available and the efforts made are isolated. It is time to become aware of the need to make intelligent use of available resources. In this work it is presented an analysis of the current situation in Argentina regarding the treatment of the C&DW from the normative point of view, examples of the activity (case studies) and future perspectives of the management and valorization of the C&DW.

Keywords: *Construction and demolition waste, recycling, environment*

INTRODUCCIÓN

En el año 1972 un informe del MIT (Massachusetts Institute of Technology) [1] hacía referencia a la urgente necesidad de hacer frente a la problemática del agotamiento de las materias primas y la incapacidad del ecosistema terrestre de recuperarse de los daños ocasionados, que hasta esa fecha no se habían abordado. En la actualidad (46 años después), si bien existe una generalizada conciencia medioambiental, las conclusiones en cuanto a la urgencia de la situación continúan vigentes. El crecimiento poblacional de manera exponencial desde la mencionada fecha (Figura 1) implícitamente involucra el crecimiento en infraestructura y consecuentemente el del empleo de recursos naturales no renovables.

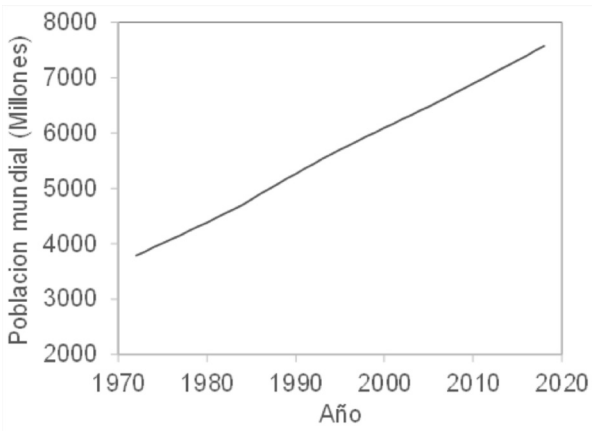


Figura 1. Crecimiento poblacional. Adaptado de Global Footprint Network 2014 [2].

Estos hechos agravan aún más la situación, que ya en 1972 se describía como critica. Desde entonces diferentes organizaciones gubernamentales y no gubernamentales han puesto el foco en la cuestión medioambiental. En tal sentido, desde el informe Brundtland en el año 1987 [3] y la definición que en él se hace de sustentabilidad, como "Aquel desarrollo que nos permite atender las necesidades del mundo actual sin dilapidar los recursos de las generaciones futuras", dicho termino comenzó a utilizarse masivamente en la última década y es una de las temáticas más abordadas a nivel mundial. Sin embargo, el uso masivo del término contrasta con los resultados obtenidos en materia medioambiental. En tal sentido, la organización Global Footprint Network [2] estima el déficit ambiental del planeta. Para ello contrasta la biocapacidad (definida como la capacidad de regeneración planetaria de hectáreas biológicamente productivas de generar un abastecimiento regular de recursos y de absorber los desechos resultantes de su consumo) con

la huella ambiental producida en el planeta (se calcula considerando distintos factores como la producción de gas carbónico, las superficies construidas, las superficies forestadas, etc.). En la Figura 2 se presenta la evolución de ambos parámetros hasta el año 2014.

El déficit es sólo uno de los indicadores de los deficientes resultados obtenidos en materia ambiental. Otros indicadores como la producción de gases de efecto invernadero (Figura 3) o el consumo energético siguen creciendo año a año, según informes de la ONU.

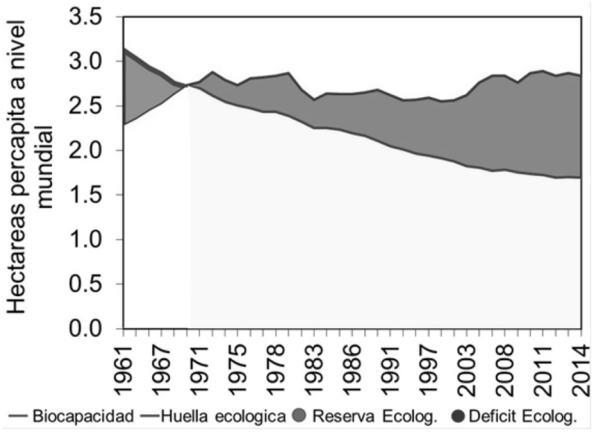


Figura 2. Crecimiento poblacional. Adaptado de Global Footprint Network 2014 [2].

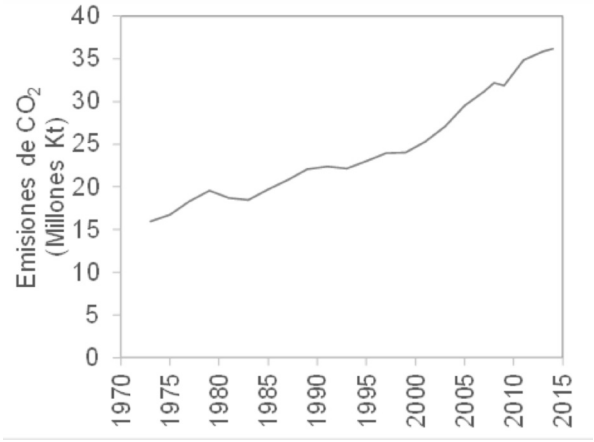


Figura 3. Emisiones de gas carbónico [4].

La emisión de estos gases no es la única causa que genera contaminación. Los desechos de toda índole (industriales, textiles, domiciliarios, etc.) que no son tratados o dispuestos de manera eficientes generan también un gran pasivo ambiental. De manera ilustrativa, la Figura 4.a-c) da cuenta de las consecuencias de la disposición y tratamiento inadecuado de distintos desechos. En a) se presenta el denominado "continente de plástico o isla de la basura" el cual es una zona del océano pacifico cubierta con desechos de todo tipo. Se estima que esta zona tiene una superficie de alrededor de 15.000.000 km², proviniendo el 80% de los residuos que integran dicha área del continente terrestre y el 20% de los barcos [5]. Otras zonas similares se han descubierto también en el océano pacifico [6]. Las distintas zonas de acumulación de basura en distintos puntos del planeta se deben a las corrientes marinas. Una particularidad observada en estos "basureros marinos" es que la mayor parte de los residuos son plásticos. La magnitud de esta contaminación sobre el ecosistema marino es aún inmensurable.

La Figura 4.b) exhibe el incendio de un vertedero de neumáticos en Canadá en el año 1990, el cual ardió durante 17 días antes que los bomberos pudieran controlar el fuego. Los humos generados por la quema de neumáticos son altamente tóxicos para la salud humana, los incendios de vertederos siguen siendo una realidad de nuestros días aun cuando la potencialidad de su reutilización es de las más altas entre los distintos tipos de residuos generados [7].

La última imagen 4.c) ilustra la masividad del uso de barbijos debido a la polución ambiental en Hong Kong. En esta región y en casi la totalidad del territorio chino las lluvias ácidas son un grave problema ambiental [8]. Este tipo de lluvias también son habituales en ciertas regiones de India, Japón, España, Canadá, Reino Unido y Holanda entre otros.

Figura 4. Consecuencias de la disposición y gestión inadecuada de residuos.

Si bien estas fotografías pueden interpretarse como hechos aislados, en el año 2017 informes de la Organización Mundial de la Salud [9] indican que el 25% de las muertes de niños menores a 5 años se producen por causas asociadas a la contaminación. Para revertir esta situación de crisis ambiental y generar un progreso tangible, es necesario avanzar en forma consistente en cuatro aspectos: técnico, normativo, de gestión y de acuerdo político.

En la industria de la construcción en particular la búsqueda de la sustentabilidad tiene tres ejes de acción concretos con foco en el ahorro del consumo energético durante la vida en servicio, el reemplazo de recursos no renovables por otros renovables o la reutilización de residuos, y el incremento de la vida útil de las estructuras [10].

El concepto de sustentabilidad implica necesariamente migrar del paradigma actual de economía lineal, basado en extraer-producir-consumir-descartar, a uno de economía circular cuyo objetivo final es, desde la concepción del proyecto, planificar un sistema que permita un eficiente uso de los recursos, donde estos sean reutilizados una y otra vez acabada su vida útil tradicional [11].

La reutilización de residuos no sólo constituye una respuesta racional en la mejora de la gestión ambiental de la actividad industrial, sino una necesidad que puede aparejar beneficios económicos [12]. En tanto que, cuanto mayor sea la durabilidad del material, menor será el tiempo y recursos que requiere su mantenimiento. Desde un enfoque ingenieril, las soluciones que pueden plantearse deben incluir necesariamente un valor agregado que convierta al desecho en un subproducto.

La construcción sustentable requiere la incorporación de criterios medioambientales desde la concepción del proyecto, en la manera de construir, mantener y "desconstruir" las obras. En tal sentido resulta necesaria una clasificación de los residuos mediante demolición selectiva a fin de separar los distintos tipos de materiales que la integran. Esto permite un mayor control de los materiales producidos a la vez que aumenta las posibilidades de reciclado.

En un gran número de países las estimaciones reflejan que entre el 25 y el 40% del total de residuos sólidos producidos son RCD [13-15]. En la Argentina no existen estadísticas fiables respecto a la generación y reutilización de los RCD. La falta de estadísticas impide dimensionar la magnitud de los residuos generados. Consecuentemente su clasificación y posible valorización quedan sujetas a casos puntuales y de ningún modo representativos.

En este trabajo se presenta un análisis de la situación actual en Argentina respecto del tratamiento de los

RCD desde el punto de vista normativo, ejemplos de la actividad (casos de estudios) y perspectivas a futuro de la gestión y valorización de los RCD.

Normativa

En nuestro País la clasificación y disposición final de los residuos están legislados por las leyes 25916/1994 y 24051/1991. En el año 2002 se sancionó la Ley 25612 que aún no se encuentra reglamentada. Esta Ley hace mención específica a los RCD. En dichas leyes se clasifican los residuos en residuos no especiales, comúnmente denominados residuos sólidos urbanos (RSU), y residuos especiales, denominados comúnmente residuos peligrosos. Establecen, además, los organismos de control y aplicación y definen la responsabilidad de cada una de las partes intervinientes en la gestión y disposición final de los residuos. Los organismos de aplicación son el ex ministerio de ambiente y desarrollo sustentable de la nación (devenido recientemente a secretaria), los organismos provinciales, los cuales en algunos casos son secretarias o subsecretarias (Pcias. de Jujuy, La Pampa, Catamarca, Córdoba, Entre Ríos, etc.) y en otras provincias ministerios (Formosa, Chaco, Misiones), y organismos específicos pertinentes tales como el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) en la provincia de Buenos Aires o direcciones generales (Santiago del Estero).

El rol de los organismos de aplicación es dictar y controlar el cumplimiento de los protocolos y normativas para el análisis, acopio, traslado y disposición final de los residuos, especialmente los peligrosos.

Este tipo de residuos son definidos en la ley como aquellos que puedan causar daños, directa o indirectamente, a los seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera, o el ambiente en general. La ley provee además un listado de los residuos peligrosos y las características peligrosas para su clasificación en subcategorías. En esta clasificación no están contemplados los RCD. Dado que los mismos no cumplen las características provistas en la ley para ser considerados peligrosos, los RCD son desde el punto de vista legal RSU. Sin embargo, este tipo de residuos se encuentra excluido de la recolección formal y son ampliamente gestionados por empresas volqueteras y/o recuperadores urbanos. Consecuentemente, cada municipio es el encargado de la disposición de los RCD y consecuentemente, de brindar el marco regulatorio para la operación de las empresas volqueteras y/o los recuperadores urbanos.

Existen además algunas reparticiones tales como la Dirección Nacional de Vialidad y la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires que poseen Manuales de Gestión Ambiental específicos para obras viales, donde han incluido capítulos referidos a la gestión y reutilización de RCDs. No obstante, es notoria la falta de legislación al respecto, en la mayoría de los municipios el marco regulatorio es inexistente. Sólo unos pocos municipios regulan a las empresas volqueteras en cuanto a su habilitación, el transporte, la disposición final y la responsabilidad por lo vertido. Sin embargo, debe mencionarse que dicha actividad tiene una alta tasa de informalidad. A modo ilustrativo puede mencionarse que en la ciudad de Buenos Aires casi el 100% de las empresas volqueteras carecen de habilitación según datos de la confederación argentina del transporte automotor de cargas.

Además de la alta informalidad que presenta el sector, debe mencionarse que aún en aquellos municipios en que el servicio se encuentra regulado se establece que es la empresa operadora quien debe velar por el contenido vertido. En tal sentido se establece expresamente la prohibición del desecho en los contenedores de residuos orgánicos, siendo la empresa operadora la responsable del control. Esta medida resulta en términos prácticos impracticable por la necesidad de la empresa de contar con personal dispuesto las 24hs para evitar el uso inapropiado de los contenedores.

Otra de las problemáticas es la disposición final del

vertido. En la mayoría de los municipios no existen predios dispuestos a tal efecto, favoreciendo de esta manera el uso de vertederos ilegales con total ausencia de control. En una gran cantidad de municipios los RCD pueden ser dispuestos en los mismos predios que se utilizan para los RSU. Sin embargo, en la mayoría de los casos se cobra una tasa de vertido a las empresas volqueteras. La falta de control y la informalidad del rubro acrecientan la disposición en vertederos ilegales. En adición cabe mencionar que, si bien a priori este tipo de residuos pueden ser considerados inertes, diversos estudios han informado acerca de emisiones gaseosas, principalmente compuestos de sulfuro [16], y contaminación potencial del agua subterránea debido al lixiviado [17]. Además, las grandes superficies ocupadas para su disposición y la falta de control de los vertederos generan un costo económico debido al desperdicio de suelo productivo.

Cabe mencionar que en países con políticas ambientales claras la tasa de vertido ha servido para fomentar eficazmente la industria del reciclaje. A modo de ejemplo puede indicarse que en Holanda desde el año 1997 se prohíbe el vertido de RCD. Ello ha conllevado a que en dicho país la tasa de reciclaje de este tipo de residuos sea del 100%. Otros países como Japón, Belgica y Luxemburgo tienen tasas de reciclaje similares [18-19]. El contraste en la eficacia que supone la tasa de vertido puede sin duda ser atribuida a la falta de control que existe en nuestro país.

Valorización de los RCD

En la Argentina, las únicas estadísticas disponibles respecto de los RCD provienen del Observatorio Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU). Sin embargo, estas estadísticas son muy poco fidedignas ya que no involucran a las empresas especializadas en el sector (volqueteras) que actúan mayormente de manera informal. Precisamente por esto, en su último informe de gestión GIRSU informa que sólo el 3% del total de los residuos sólidos generados corresponde a RCD [20]. Este porcentaje contrasta con lo reportado en países que poseen una política de gestión y clasificación de RCD. En China, con una población de 1325 millones de personas en el año 2008, los RCD fueron del 40% del total de los residuos sólidos generados [21]. En Europa los RCD representan el 49% del total de los residuos generados [22]. En Australia, Estados unidos y Brasil estos porcentajes se encuentran en torno al 30% [23]. Si bien la cantidad de residuos, así como su composición dependen de las condiciones locales, resulta claro que el porcentaje informado por GIRSU subestima la cantidad de RCD generados, ya que sólo considera la fracción generada en las viviendas.

Este tipo de residuos tienen una gran potencialidad de recuperación, existen en la literatura numerosos ejemplos de la viabilidad económica de la reutilización de los RCD en la industria de la construcción [24-27]. Una gran diversidad de países, entre los que pueden mencionarse Bélgica, Dinamarca, España y Japón, han generado una economía secundaria al crear cooperativas que se ocupan de la clasificación y comercialización de los RCD.

Para que estos residuos puedan ser reutilizados en un 100% resulta fundamental su clasificación en origen. Países tales como Brasil, Japón y Estados Unidos, junto con muchos de los integrantes de la Unión Europea, entre muchos otros, cuentan con normativas y reglamentaciones de valorización de los RCD. Estas normativas imponen la demolición selectiva con el fin de separar los distintos tipos de materiales que la integran los RCD.

En la Argentina existen pocos antecedentes que contemplen este tipo de procedimientos. Sin embargo, existen otros modelos de cálculo que permiten la estimación de la cuantificación y composición de los RCD. Estos métodos se inician en la etapa de diseño de las obras y se basan en las cantidades de materiales empleados. Dichos métodos permiten evitar la demolición selectiva, facilitando la separación posterior en vertederos

con capacidad de reciclaje [28-30].

En un estudio de caso Nacional [31] sobre un conjunto habitacional de ocho viviendas (con superficie aproximada de 65 m2 cada vivienda) se obtuvo la composición potencial de residuos generada durante el plazo de obra (Figura 5). Es de notar que la mayor cantidad del residuo generado son mezclas (restos de mortero de asiento y revoque).

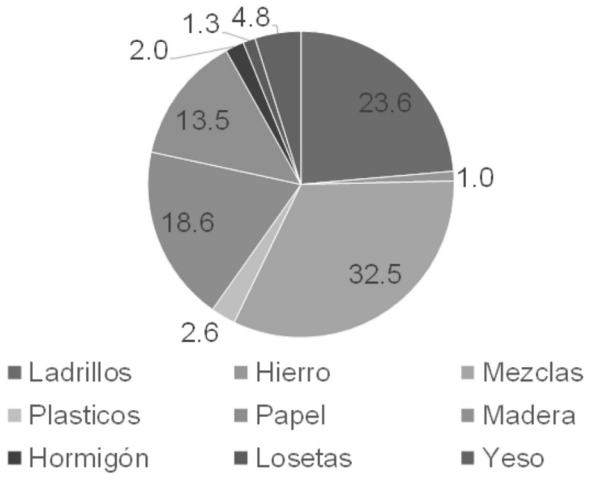


Figura 5. Composición potencial de residuos de obra.

Los datos presentados en la Figura 5 son ilustrativos de los residuos que pueden generarse. La composición variará en cada obra en particular en función del tipo de estructura a ejecutar y/o a demoler, el método constructivo y las características propias del lugar de emplazamiento, hábitos y costumbres de la población, nivel socio-económico, etc.

En los países en que los RCD se gestionan y reutilizan eficientemente los usos habituales comprenden escombros, material de relleno y agregados para distintas mezclas [32]. Existe también dentro de los RCD un porcentaje menor de materiales que no pueden ser utilizados para estos fines, tales como tierra, yeso, metal, madera, papel, plástico, cartón, materia orgánica y vidrio. De estos materiales, algunos pueden ser seleccionados y reutilizados como envases de papel y cartón, madera, y el mismo vidrio y metal pueden ser recogidos y reutilizados en otras industrias.

El reciclaje de los RCD como fuera mencionado tiene una fuerte implicancia medioambiental, su empleo como agregado supone importantes ventajas ecológicas, dado que disminuye la cantidad de residuo a ser vertido y además disminuye la demanda de agregados naturales que muchas veces son devastados en la actividad de extracción y se encuentran actualmente en franco agotamiento. Otra ventaja ambiental del empleo de los RCD es su reutilización in situ, por cuando disminuyen la necesidad de transporte, lo cual tiene un impacto ambiental favorable a la vez que reduce costos.

Una gran cantidad de países permiten el empleo de RCD triturado como agregado para la elaboración de hormigones estructurales y no estructurales. En la Tabla 1 se recogen la normativa de los países en que los RCD están contemplado como agregado en hormigones.

El empleo de agregados reciclados en el hormigón es un tema fuertemente abordado a nivel internacional desde hace décadas debido a que los mismos pueden ser hasta el 50% del total de los RCD generados [14-15].

Los demás componentes de los RCD también suponen un gran potencial de reutilización. Algunos de los usos que pueden señalarse son recubrimiento de rellenos o construcción de caminos en el relleno sanitario, en obras civiles (vías de acceso en la zona afectada, diques, taludes, etc.). Para conformar un programa de reutilización y reciclaje, es necesaria la evaluación del potencial de reutilización y reciclaje.

Tabla 1. Países con normativa para el uso de RCD en hormigones.

País	% que permite reemplazar	Resistencia máxima del hormigón en el que serán empleados (MPa)	Limitaciones
Brasil	100%	15	Hormigón no estructural
Dinamarca	20	20	Hormigón emplazado en ambientes no agresivos
Holanda	100	25	---
Japón	100	18	Hormigón de cimientos
Rusia	50	15	Hormigón no pretensado
Suiza	100	--	Hormigón no pretensado

CONSIDERACIONES FINALES

Existe un vacío legal respecto a la regulación de la gestión y disposición final de los residuos de la construcción y demolición (RCD), ello no sólo dificulta la realización de estudios que contemplen la cuantificación y clasificación de tales residuos, sino que además torna más factible su contaminación. Este hecho a su vez disminuye la potencialidad de su reutilización.

De los 2100 municipios que integran el país sólo unos pocos poseen normativa que regulen la disposición final de los RCD. En aquellos donde tal regulación existe, la falta de controles por parte del estado y la alta tasa de informalidad del sector contribuyen a la generación de vertederos ilegales, que con el tiempo se convierten en basurales a cielo abierto. En países con políticas ambientales claras y eficiente el cobro de la tasa de vertido, o en algunos casos la prohibición de verter estos residuos, ha logrado un alto porcentaje de reutilización.

El reciclaje de los RCD no sólo contribuye a mitigar el impacto ambiental que genera la industria de la construcción, sino que además es posible generar economías secundarias en base a una red de cooperativas que se encarguen de la clasificación y comercialización de los RCD. Para ello es indispensable la actuación del estado como ente regulador y controlador.

REFERENCIAS

1.- Meadows, D.H., Meadows, J.R., Behrens, W.W. (1972). The limits to growth: A report for the club Rome, Project on the predicament mankind. Universe Books ISBN 0-87663-165-0

2.- Global Footprint Network. Texto publicado en www.footprintnetwork.org. Último acceso: 22/10/2018.

3.- Brundtland, G.H. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. ONU.

4.- WMO 2017. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017. Greenhouse gas bulletin. 14, 1-8.

5.- Day, R.H., Shaw, D., Ignell, S.E. (1990). The quantitative distribution and characteristics of neuston plastic in the North Pacific Ocean, 1984-1988. Proceedings of the Second International Conference on

Marine Debris, April 2-7,1989. Honolulu, Hawaii.

6.- Thompson, R., Olsen, I., Mitchel, R., Davis, A., Rowland, S., John, Russell, A. (2004). Lost at Sea: Where is All the Plastic? Science, 304, 384.

7.- Ramos, G., Alguacil, F., López, F. (2011). The Recycling of end-of-lite-tyres. Technologicla Review. Revista de Metalurgia, 47 (3), 273-284.

8.- Nagase, Y., Silva, E.C.D. (2007). Acid rain in China and Japan: a game-theoretic analysis. Regional Science and Urban Economics. Elsevier 37 (1), 100-120.

9.- OMS (2017). No contamines mi futuro El impacto de los factores medioambientales en la salud infantil. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

10.- ITEC (1998). Situación actual y perspectiva futura de los residuos de la construcción. Proyecto Life. Dirección General de Medio Ambiente, DGXI – Comisión Europea.

11.- Sánchez, A.B. (2016). Hoja de ruta hacia un modelo sustentable. Informe Técnico sobre la Sustentabilidad en España. Fundación Alternativas. 161p.

12.- Mora, C., Manzini, R., Gamberi, M., Cascini, A. (2014). Environmental and economic assessment for the optimal configuration of a sustainable solid waste collection system: a 'kerbside' case study. Production Planning & Control - The Management of Operations, 25 (9), 737-761.

13.- CSI (2009). The cement sustainability initiative. recycling concrete: executive summary. Genéve: Cement Sustainability Initiative.

14.- Fischer, C., Werger, M. (2009) EU as a recycling society. present recycling levels of municipal waste and construction & demolition waste in the EU. In: ETC/SCP working paper 2/2009. Copenhagen, Denmark.

15.- Sáez, P.V., Merino, M. R., Porras-Amores, C. (2011). Managing construction and demolition (C&D) waste – a European perspective. In: International conference on petroleum and sustainable development, IPCBEE, Dubai, UAE, 27–31.

16.- Lee, S., Xu, Q., Booth, M., Townsend T., Chadik, P., Bitton, G. (2006). Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills. Waste Management, 26, 526- 533.

17.- Weber, W., Jang, Y., Townsend, T., Laux, S., (2002). Leachate from land disponed residential construction waste. J. Environ. Eng. 128 (3), 237-245.

18.- Tam, V.W. (2009). Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. Journal of Cleaner Production. 17, 688-702.

19.- Florea, M.V.A., Brouwers, H.J.H. (2014). Activation of liberated concrete fines and their application in mortars. Construction and Building Materials, 50, 1-12.

20.- Engirsu (2005). Estrategia Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos. República Argentina. Diagnóstico de situación. Secretaria de ambiente y desarrollo sustentable. Ministerio de salud y Ambiente.

21.- Li, X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China: Parte I. Material Behaviour of recycled aggregates concretes. Resources, Conservation and Recycling. 53, 36-44.

22.- Eurostat (2011). Statistical office of the European Communities. Statics Database.

23.- Bossink, B.A.G., Brouwers, H.J.H. (1996). Construction waste: Quantification and source evaluation. Journal of construction engineering and management, 122 (1), 55-60.

24.- Marzouk, M., Azab, S. (2014). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. Resources, Conservations and Recycling, 82, 41-49.

25.- Duran, X., Lenihan, H., O´Regan, B. (2006). A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling- the case of Ireland. Resources, Conservations and Recycling, 46 (3), 302-320.

26.- Zhao, W., Leeftink, W., Rotter, V.S. (2010). Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China — The case of Chongqing. Resources, Conservations and Recycling, 54 (6), 377-389.

27.- Banias, G., Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Tarsenis, S. (2010). Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. Building and Environment, 46 (10), 2317-2326.

28.- Coelho, A., de Brito, J. (2011). Generation of Construction and Demolition Waste in Portugal. Waste Management & Research, 29 (7), 739-750. doi: 10.1177/0734242X11402253.

29.- Jack, C.P.C., Lauren, Y.H. (2012). A BIM-based System for Demolition and Renovation Waste Estimation and Planning. In 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Moscow. Kowloon, Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology.

30.- Mercader-Moyano, P., Arellano-Agudo, A., Cózar-Cózar, E., Ruesga-Díaz, J. (2017). Sistema BIM de cuantificación automática de los residuos de construcción y demolición. Método de transferencias ponderadas de la medición. Estudios del Habitat, 15 (2), 499-507.

31.- Mercante, I.T. (2007). Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental. Revista Científica de la Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales 11, 86e109.

32.- Rocha Osorio, C.L. (2015). Aprovechamiento y revalorización de residuos de la construcción y demolición generados por un evento adverso para la construcción de obras civiles sostenibles. Tesis de especialista. Universidad Católica de Manizales Facultad de Ingeniería Manizales – Caldas. Colombia. 68p.

GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN. ANÁLISIS SISTEMATIZADO DE LA NORMATIVA APLICADO A LA INTERRELACIÓN ESPAÑA – ARGENTINA.

MANAGEMENT CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE. SYSTEMATIZED ANALYSIS OF THE REGULATIONS APPLIED TO THE INTERRELATION SPAIN - ARGENTINA.

N. A. Valoni[1]

[1] *Magister Universidad de Extremadura – Escuela Politécnica Graduada en Arquitectura - Universidad de Morón – Argentina. natyvaloni@gmail.com*

RESUMEN

La actividad de la construcción es uno de los mayores generadores de residuos sólidos, conocidos tradicionalmente como residuos de la construcción y demolición (RCD). En la actualidad, a pesar de la crisis económica que atraviesa el sector constituyen el principal flujo de residuos a nivel internacional. Este escenario genera diversas problemáticas en las sociedades modernas, no encontrándose regulada su gestión en países en desarrollo. Debido a la falta de regulación y disciplina en la gestión de esta tipología de residuos se produce una pérdida de tipo económico (generación de empleos directos e indirectos, pérdida de recursos, etc.), acompañada de un crecimiento de vertederos que suponen un gran impacto medioambiental. El presente trabajo fin de master trata de contextualizar y analizar la situación planteada en el ámbito de la gestión de RCD en España, para posteriormente ser comparada con el escenario actual en la República Argentina.

Palabras clave: *Residuos de Construcción y Demolición (RCD), normativa, gestión, España, Argentina.*

ABSTRACT

Construction generates vast amounts of what is traditionally known as construction and demolition waste (CDW). Despite the crisis presently affecting the industry, it constitutes one of the major sources of solid waste worldwide, raising serious concerns in modern societies. The lack of regulation and its enforcement to ensure satisfactory management, particularly in developing countries, is responsible for economic loss (untapped potential to create direct and indirect jobs, resource mismanagement) as

well as for a substantial environmental footprint in the form of ever larger spoil heaps. This master's dissertation contextualises and analyses the status of C&DW management in Spain, which is compared to the situation in place in the Argentine Republic.

Keywords: *Construction and Demolition Waste (CDW), regulations, management, Spain, Argentina.*

INTRODUCCIÓN

A través de la historia de las sociedades hemos visto crecer y complejizarse la problemática de los residuos sólidos y su disposición final, la situación tomó notoriedad y se agravó tras la implementación del llamado Estado de Bienestar, a fines de la segunda guerra mundial, instaurando la sociedad de consumo. Como consecuencia de estos acontecimientos proliferó la utilización de productos descartables y se introdujeron nuevos materiales en el mercado, los desechos comenzaron a multiplicarse haciendo incapaz al medio de absorber estas cantidades y generando una sobreexplotación peligrosa, afectando a la calidad de vida de las personas y al medioambiente.

Gran porcentaje de los Residuos Sólidos (RS), también llamados Residuos Sólidos Urbanos (RSU) producidos corresponden a los Residuos de Construcción y Demolición (intención o la obligación de desechar y que se haya originado en las diferentes etapas de una RCD), definidos como sustancia u objeto que su poseedor desecha, tenga la obra civil, ya sea en su construcción, remodelación o demolición. Económicamente hablando, los RCD son un margen significativo de la inversión en una obra, se estima que representan de 15% a 20% del valor total final de esta.

Enmarcando la problemática se debe resaltar que el sector de la construcción consume el 40% de la energía producida, es responsable del 50% de las emisiones de CO2 en la atmósfera y se estima que la construcción civil consume entre el 20 y el 50% de los recursos naturales. El sector es responsable de más de la mitad de los residuos sólidos generados en el mundo [1].

El artículo tiene como objetivo principal realizar un diagnóstico del estado de la situación actual a nivel nación sobre la gestión de residuos de demolición y construcción, para el ámbito de la República Argentina y España, buscando identificar las dificultades y beneficios de dichos procesos. Se trata de exponer por medio de un análisis sistematizado legislativo de ambos países la relevancia que posee la minimización y gestión de residuos generados en el ámbito de la construcción civil ligado a sus impactos ambientales.

La importancia de analizar estas dos realidades aparentemente distantes radica en el enriquecimiento intelectual para abordar una problemática tan compleja, dado que mediante una correcta regulación y un manejo adecuado de los RCD se puede mejorar el medio ambiente y la calidad de vida de los ciudadanos. El objetivo para los dos países es emprender un camino hacia una sociedad eficiente en el uso de los recursos por medio de las 3R, Reducir, Reciclar y Reutilizar [2], en los que la reducción o prevención es la primera opción de gestión, seguida de la reutilización y el reciclaje, valorizando materiales y energías, y finalmente eliminación adecuada de los desechos producidos [3].

Ambos países pueden encontrar beneficios al conocer realidades distintas y formas diversas de trabajo ante una misma problemática. Por medio de esta aportación se busca continuar con el camino transitado en el ámbito de las relaciones internacionales intelectuales e investigadoras que Argentina y España comparten históricamente, siendo un instrumento para la internalización investigadora de la comunidad científica.

II. MATERIAL Y MÉTODO

II. 1. Metodología

Para lograr cumplir con los objetivos planteados, se ha realizado:
- Un análisis de la normativa y producción científica, sobre la gestión de residuos de construcción y demolición en España y Argentina, mediante una revisión sistematizada [4].
- Revisión de la documentación existente relacionada con el presente trabajo.

En esta metodología es importante garantizar que los resultados de la revisión sean válidos, para ello se debe de realizar un análisis que cumpla con los requisitos de una revisión sistematizada haciendo evidentes los siguientes procedimientos, pertenecientes al framework SALSA: Search, Appraisal, Synthesis y Analysis [5].

II. 2. Desarrollo del trabajo
II. 2.1. Comparativa Normativa

Conocer la actualidad de la normativa jurídica de España en comparación con la de Argentina sobre un tema particular, nos permite profundizar en cuestiones decisivas sobre la situación que atraviesa cada territorio y qué implicancia posee. Además, estos países se enriquecen literariamente ya que tendrán más herramientas y estudios en donde respaldarse para futuras decisiones. La Tabla II. 1 y Tabla II. 2 sintetiza el contexto legislativo que España y Argentina transitan ante la gestión de residuos sólidos, implicándonos en los residuos de construcción y demolición.

Tabla II. 1. Comparación de normativa entre los países. (Elaboración propia)

		ESPAÑA	ARGENTINA
DATOS GENERALES	Superficie	506.030 km^2	3,8 millones km^2
	Habitantes	46.659.302 (año 2016)	40.117.096 (año 2010)
	Densidad Poblacional	92,16 hab/km^2	14,40 hab/km^2
	Comentario	Siendo Argentina un país casi 5,5 veces más grande que España (considerando la superficie continental) es notable la despoblación que posee. Es importante destacar que un tercio del total la población habita la Ciudad Autónoma y su área metropolitana (15 millones de habitantes aproximadamente).	
NORMATIVA	Organización jurídica que regula la gestión de residuos	El escalonamiento de jerarquización jurídica comienza por la Unión Europea (EU), el Estado Español y por último la organización territorial de las Comunidades Autónomas (CCAA).	La jerarquización se inicia por el Estado Argentino, con un coordinador inter jurisdiccional, el Consejo Federal del Medio Ambiente (COFEMA) a cargo de SAyDS, para regular y controlar el último eslabón, Ciudad Autónoma, Provincias y Municipios.
	Planes de Gestión de RSU	A nivel europeo la Directiva 2008/98/CE Marco de Residuos (DMR). A nivel nacional el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, [6]. Las CCAA desarrollan sus propios planes como, por ejemplo, la Comunidad de Extremadura el Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2016-2022, [7].	A nivel nacional se encuentra la Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU) 2005-2025, [8]. A nivel provincial, por ejemplo, Salta redacta el Plan Provincial de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos mediante el Decreto 1.365/10.
	Comentario	La gran diferencia entre los planes de residuos a nivel nacional radica en sus objetivos. El ENGIRSU plantea objetivos generales con sus fases de revisión y actualización que son aplicables a todo tipo de residuo, en cambio el PEMAR, redacta objetivos cualitativos y cuantitativos para cada tipología de residuos, entre ellas los RCD.	

Tabla II. 2. (continuación) Comparación de normativa entre los países. (Elaboración propia)

		ESPAÑA	ARGENTINA
NORMATIVA	Normativa específica de RCD	El país constituye el Real Decreto 105/2008, [9] como instrumento normativo específico para los RCD Las CCAA en algunos casos tienen normativa propia como la Comunidad de Galicia que cuenta con el Programa de gestión de residuos de la construcción y demolición de Galicia 2013-2016, [10].	Este país no cuenta con normativa particular para los RCD, sino que existen aproximaciones que todavía se encuentran en desarrollo. La propuesta por la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, es el Proyecto de Reciclado de residuos para las Obras Civiles desde la Química, los Materiales y el Medio Ambiente (PROCQMA), [11].
	Comentario	España destaca sobradamente en este punto ante Argentina, ya que tiene una larga experiencia. Se observa en todos los ámbitos de aplicación el desarrollo legislativo detallado para cada instancia de manejo en RCD, mientras que en Argentina se está comenzando a plantear proyectos que a través de futuras evaluaciones y modificaciones pueden llegar a lograr una base normativa en este ámbito.	
	Normativa técnica	Cuenta con la Instrucción de Hormigón estructural [12], el PG-3 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes [13], que regulan la utilización y métodos de ensayos para materiales reciclados, y la Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (GEAR) [14], proyecto técnico-científico con un enfoque estadístico.	El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) desarrolla, estudia y publica normas técnicas, por ejemplo en el caso de hormigones regula métodos de ensayo para comprobar las propiedades afectadas [15].
	Comentario	La colaboración activa de entidades del campo científico logra organizar, recopilar y regular técnicas y procedimientos ante los RCD. El contraste entre ambos países surge en lo específicas que son estas normas, ya que en España se centran en los áridos reciclados teniendo un enfoque estadístico y Argentina reduce su campo a los agregados triturados para la elaboración de hormigones con un enfoque en las operaciones de experimentación.	

II. 3. Comparativa de Residuos

Un correcto conocimiento del objeto de estudio constituye el fundamento real donde se conectan los hechos, es imposible transformar aquello que no se conoce, ni investigar un área que no se domina. La Tabla II. 3 y Tabla II. 4 contiene los aspectos fundamentales que fueron analizados en cuanto a la caracterización de residuos de construcción y demolición.

El campo investigador de Argentina desde hace algunos años comenzó a concientizarse sobre la ausencia de normativa en el ámbito de los RCD, es por este motivo que nos encontramos con una creciente producción científica por medio de publicaciones. El artículo titulado "Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental" [17], recopila un extenso estudio de una obra residencial tomada como muestra para conocer la composición de sus RCD. Al igual que las reflexiones obtenidas en la Tabla II. 3, las conclusiones del artículo de la autora citada revelan la falta de datos confiables en el sector de la construcción para lograr conformar una base o inventario permanente de caracterización de RCD, por medio de los cuales consolidar los índices de generación útiles en la gestión de residuos.

II. 4. Comparativa en Gestión de Residuos de Construcción y Demolición

La premisa de este trabajo de investigación es evaluar la gestión de RCD en los dos países seleccionados, conformando un diagnóstico de la situación actual. Contar con la posibilidad de contrastar estas dos realidades permite sumar una aportación al área de investigación y afianzar las relaciones internaciones establecidas entre España y Argentina. La Tabla II. 5 recopila la información más relevante sobre nuestro tema de estudio.

Tabla II. 3. Comparación de residuos entre los países. (Elaboración propia)

		ESPAÑA	ARGENTINA
CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS (RCD)	Según Origen	Residuos procedentes de puntos de extracción de áridos o procedentes de movimientos de tierra: materiales de origen pétreo, de naturaleza y de granulometría variable. Residuos de construcción: compuesto mayoritariamente por residuos de origen pétreo y cerámico. Se encuentra fundamentalmente restos de hormigón y cerámicos procedentes de recorte y materiales rotos. Residuos de demolición: son similares a los de construcción a diferencia de la mezcla de los residuos, ya que al demoler una edificación la separación en obra se dificulta.	
	Según Naturaleza	Residuos inertes: estos no presentan ningún riesgo de polución del agua, del suelo y el aire. Residuos no peligrosos: no presentan problemas de toxicidad por sí mismos. Residuos tóxicos y peligrosos: también llamados especiales en Argentina. Son los residuos que contienen sustancias peligrosas o tóxicas para el ser humano o contaminantes para el medio ambiente.	
	Según Codificación	Representada por un código de seis cifras. Las dos primeras pertenecen a la tipología, en el caso de RCD es la 17, las cuatro siguientes son para designar los subcapítulos y capítulos a los cuales pertenecen. (17 00 00)	Según el PROCQMA utiliza seis cifras de las cuales las dos primeras responden a la tipología, para RCD es la 01. Las cuatro cifras continuas son para las subcategorías y material, estas dos se agrupan además según su potencial de reciclado fuera o dentro de la obra. (01 00 00)
	Comentario	A pesar de que ambos países utilicen una codificación de seis cifras, difieren principalmente debido a que en Argentina no está reglamentada este tipo de clasificación ya que pertenece al proyecto PROCQMA.	
	Valorización	Se contemplan en el Ley 22/2011 [16], 13 posibles operaciones de valorización de los residuos por medio de una codificación, designada con la letra R y su número.	No tiene especificación en este apartado.
	Comentario	En el ámbito territorial argentino es dificultoso hablar sobre valorización ya que la mayor cantidad de RCD son desechados por medio de empresas "volqueteras", que generalmente utilizan sin control ni regulación estos residuos triturando el escombro para relleno en hormigón pobre o suelos.	
	Disposición Final	El PEMAR estable los niveles de control para garantizar que los residuos sean depositados en los vertederos correspondientes. El Real Decreto 105/2008 [9] dictamina que los RCD deben ser sometidos a operaciones de tratamiento previo para ser eliminados.	La problemática reside en la manera informal e ilegal de eliminar los RCD por medio de "volquetes". Según el ENGIRSU el 44% de los RSU son dispuestos de forma inadecuada. La Ciudad Autónoma de Buenos Aires es una de las pocas que posee un registro de empresas "volqueteras" para su posterior valorización y eliminación.
	Comentario	Hay tres amplias opciones de disipación final en ambos países, el relleno de suelo (en Argentina llamado relleno sanitario), la incineración (tratamiento térmico) o la disposición en vertederos. En Argentina es destacable que el ENGIRSU promulga en sus objetivos la eliminación y clausura de los basurales a cielo abierto para garantizar la calidad de vida de sus habitantes.	

Tabla II. 5. Comparación de gestión de RCD entre los países. (Elaboración propia)

Tabla II. 4. (continuación) Comparación de residuos entre los países. (Elaboración propia)

Tabla II. 5. (continuación) Comparación de gestión de RCD entre los países. (Elaboración propia)

		ESPAÑA	ARGENTINA
GESTIÓN DE RESIUDOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	**Plantas de tratamiento**	Serían necesarias 146 instalaciones de tratamientos, actualmente transitan la problemática del coste del material reciclado y el material final terminado.	Una planta habilitada de tratamiento de áridos se encuentra en el Centro de Reciclado de Villa Soldati, Buenos Aires y recibe 600 camiones por día de RCD. [18].
	Comentario	España sufre una situación delicada debido a la reducción en la generación de RCD en estos últimos años, las plantas de tratamiento no reciban residuos suficientes para continuar su actividad. En Argentina sucede una situación aún más problemática, no existen los suficientes controles para la correcta valoración de los residuos, sumado a la falta de instalaciones de tratamiento para dar respuesta a la generación actual de RCD.	
	Vertederos	Deben cumplir con la normativa del Real Decreto 1481/2001 [19]. Según el PNRCD sería necesario para la gestión de RCD 207 vertederos en España.	El principal vertedero es el centro de **Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE),** donde reciben RSU del Gran Buenos Aires, incluyendo la Ciudad de Buenos Aires y 34 partidos de su conurbano.
	Comentario	Según el ENGRISU en Argentina el 44% o casi 15000 toneladas diarias del total de RSU que se generan son dispuestas en forma inadecuada, de las cuales entre el 3 al 6% corresponden a la tipología de RCD.	

III. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en el presente artículo son:

— España y Argentina se organizan jurídicamente de forma similar, aunque, vale resaltar que en España, debido a una integración regional que Argentina no ha alcanzado, se agrega el marco normativo de la Unión Europea.

— Los planes de gestión de residuos a nivel nacional se diferencian en sus objetivos. Por un lado, el PEMAR (España) redacta objetivos de tinte cualitativo y cuantitativo para cada tipología de residuos, entre ellos los RCD. Del otro, El ENGIRSU (Argentina) plantea objetivos generales por fases que son aplicables a todo tipo de RSU, sin distinción.

— En la normativa española se recogen los RCD como un residuo específico, mientras que en la normativa Argentina son incluidos dentro de los RSU.

— España tiene desarrollo legislativo detallado para cada instancia de manejo en RCD, con las ventajas que ello implica. Sin embargo, en Argentina recién se están comenzando a esbozar proyectos, como el PROCQMA, con un minucioso análisis del manejo de los RCD.

— Las normas técnicas en España se han hecho siguiendo un enfoque integrador en el cual se regulan los métodos de ensayo y las características necesarias que deben cumplir los materiales reciclados entre ellos, áridos reciclados, para su futura reinserción en el sistema productivo. En marcado contraste, las normas IRAM argentinas desarrollan los procedimientos técnicos que corresponden a cada método de ensayo para comprobar las propiedades afectadas en hormigones. Aquí se deja ver el deficiente e incompleto tratamiento argentino a la luz del holístico enfoque del sistema español.

— La caracterización de RCD no existe en Argentina, debido en gran parte a que son desechados de modo informal mediante empresas "volqueteras", un modus operandi de precariedad un tanto común en un país en desarrollo. Otra razón deriva de la inexistencia de una base de datos estadística confiable realizada a partir de un muestreo real de la situación de los RCD en cada

etapa de la obra.

— Como posible debilidad podría mencionarse que la gestión de RCD seguida por España se tradujo en elevados precios finales del material reciclado en comparación con los del material virgen y en el hecho de que muchas plantas de tratamiento se encuentran inactivas hoy día por falta de residuos al haber alcanzado su ansiado objetivo de minimizar la generación de RCD. Como se observa, una situación satisfactoria, pero que genera un panorama delicado.

— La mayor debilidad de Argentina es la falta de un plan de gestión de RCD a nivel nacional. El peligro de las lagunas normativas o reglamentarias es que dan lugar a que cada quien actúe deliberadamente (tal cual sucede con el fenómeno de los "volquetes"), con sus consecuentes repercusiones perjudiciales a nivel medioambiental y daños en la calidad de vida de las personas.

Para concluir, el haber analizado ambas realidades normativas, arroja la evidencia de que existe un vacío legal en Argentina, que lamentablemente da lugar a irregularidades en la práctica en contraste con un corsé legal en el que se sujeta con firmeza la total gestión de los RCD en España. Esta diferencia existente entre ambos países conlleva a que los mecanismos de solución españoles debieran ser adoptados en Argentina como guía u orientación. En este proceso, se debe de ser consciente que ambos países presentan realidades y contextos de desarrollo totalmente diferentes.

IV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.- JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000, 102.

2.- YEHEYIS, M., K. HEWAGE, M. S. ALAM, C. ESKICIOGLU, et al. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. Clean Technologies and Environmental Policy, 2013, 15(1), 81-91.

3.- RODRÍGUEZ, G., C. MEDINA, F. ALEGRE, E. ASENSIO, et al. Assessment of construction and demolition waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency. Journal of Cleaner Production, 2015, 90, 16-24.

4.- GOUGH, D., S. OLIVER AND J. THOMAS An introduction to systematic reviews. Edtion ed.: Sage, 2017. ISBN 1473968216.

5.- PETTICREW, M. AND H. ROBERTS Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide. Edtion ed., 2005. ISBN 978-1-405-12110-1.

6.- MINISTERIO DE AGRICULTURA, A. Y. M. A. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. In., 2015.

7.- CONSEJERA DE MEDIO AMBIENTE Y RURAL, P. A. Y. T. Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX). In. Diario Oficial de Extremadura (DOE) N ° 12, Miércoles, 18 de enero de 2017. España, 2016-2022 p. 143.

8.- MINISTERIO DE SALUD Y AMBIENTE, S. D. A. Y. D. S. Estrategia Nacional para la Gestión

Integral de Residuos Sólidos Urbanos. In R. ARGENTINA. 2005.

9.- MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. Real Decreto 105/2008. In. España, 2008.

10.- VIDAL RAINHO, C. Estudio Comparativo de los Sistemas de Gestión de RCDs entre España y Brasil 2015.

11.- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Proyecto de Reciclado de Residuos para las Obras Civiles de la Química, los Materiales y el Medio Ambiente (PROGMA). In. Argentina, 2008.

12.- MINISTERIO DE FOMENTO. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). In. España, 2008.

13.- MINISTERIO DE FOMENTO. PG-3 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. In. España, 2002, modificado 2015.

14.- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE GESTORES DE RCD, G. Guía española de áridos Reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). In. Madrid, España, 2012.

15.- SOTA, J. D., L. P. TRAVERSA, A. A. DIMAIO AND C. ZEGA Reciclado y fijación de RCD y RP en una matriz de cemento de cemento portland. CINPAR 2010.

16.- JEFATURA DEL ESTADO. Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados. In B.O.D. ESTADO. España, 2011, vol. 30.

17.- MERCANTE, I. T. Caracterización de residuos de la construcción. Aplicación de los índices de generación a la gestión ambiental 2007.

18.- BUENOSAIRESCIUDAD. In. Argentina: http://www.buenosaires.gob.ar/ambienteyespaciopublico/higiene/centro-de-reciclaje-de-la-ciudad/planta-de-aridos, 2017, vol. 2018.

19.- CALIDAD AMBIENTAL, S. G. Real Decreto 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos. . In. España, 2003.

AGREGADOS RECICLADOS DE HORMGIÓN.
Comportamiento mecánico del hormigón reciclado

RECYCLED CONCRETE AGGREGATES.
Mechanical behaviour of recycled concrete

C.J. Zega[1], M.E. Sosa[2], A.A. Di Maio[1]

[1] LEMIT, CONICET. e-mail: hormigones@lemit.gov.ar
[2] Departamento de Ingeniería Civil. UTN-FRLP.

RESUMEN

La historia muestra que la sociedad ha considerado como una práctica habitual la recuperación y uso de muchos elementos desechados. Por un lado, la construcción siempre ha tenido una cierta tendencia al ahorro, aprovechando todo resto o residuo que quedaba de construcciones anteriores que tuviera interés. Sin embargo, diferentes motivos han llevado a que estas costumbres cambien. Por otro lado, la propia industria de la construcción siempre ha sido considerada como generadora de una gran cantidad de residuos, al mismo tiempo que posee una larga tradición en cuanto a la capacidad de reutilizarlos, no solamente sus propios residuos sino también los residuos de otras industrias. Diversos factores han llevado a estudiar los residuos de construcción y demolición, fundamentalmente los residuos de hormigón, con miras a su aprovechamiento en la elaboración de nuevos hormigones. En este trabajo se presentan resultados de diferentes propiedades de agregados gruesos y finos reciclados, obtenidos de la trituración de hormigones de diferentes características tecnológicas, como también de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de los hormigones con ellos elaborados, empleándolos como reemplazo parcial de los respectivos agregados naturales.

Palabras clave: *sustentabilidad; residuos de hormigón; reciclaje; agregados.*

ABSTRACT

History shows that society has considered the recovery and use of many discarded items as a habitual practice. On the one hand, construction has always had a certain tendency to save, taking advantage of everything that remained of previous constructions that had interest. However, different reasons have led to these habits change. On the other hand, the construction industry itself has always been considered as a generator of a large amount of waste, at the same time it has a long tradition in terms of

the ability to reuse it, not only its own waste but also the waste of other industries. Several factors have led to the study of construction and demolition waste, mainly concrete waste, with a view to its use in the development of new concrete. This paper presents results of different properties of coarse and fine recycled aggregates, obtained from the crushing of concretes of different technological characteristics, as well as the compressive strength and modulus of elasticity of concretes made with them, using them as a partial replacement of the respective natural aggregates.

Keywords: *sustentability; concrete wastes; recycling; aggregates.*

INTRODUCCIÓN

Durante miles de años las mejoras en la calidad de vida han sido el indicador de cualquier sociedad desarrollada. Este indicador ha estado siempre asociado a la presencia de infraestructuras que facilitan el desarrollo de las actividades diarias, pero casi nunca se ha tenido en cuenta el impacto que las mismas pueden provocar.

La historia muestra que la sociedad ha considerado como una práctica habitual la recuperación y uso de muchos elementos desechados. Numerosas civilizaciones han utilizado y reutilizado diversos materiales de construcción de civilizaciones anteriores o de sus propias construcciones destruidas, para construir nuevas construcciones. Los restos de las construcciones romanas fueron aprovechados sistemáticamente por los propios romanos y por los árabes. Los restos de las iglesias románicas en mal estado fueron las suministradoras de materiales de construcción de numerosas masías. Recordemos que la pedrera de fuero romano fue utilizada para la construcción de la basílica renacentista del Vaticano. La Alemania de la postguerra muchas veces aprovechó los materiales de demolición que habían quedado, para utilizarlos en las nuevas construcciones.

La construcción siempre ha tenido una cierta tendencia al ahorro, aprovechando todo aquello que quedaba de construcciones anteriores que tuviera interés. La evolución de los medios de transporte, el gran desarrollo de los medios de elevación y sobre todo la tendencia consumidora de nuestra sociedad reciente han conseguido que este componente importante de la construcción haya cambiado. Todo debe ser nuevo y lo viejo debe ser tirado. Pero la consecuencia más directa de esta forma de "evolución" ha sido que el incremento de los residuos se fuera constituyendo en un gran problema, fundamentalmente de tipo ambiental. Este hecho ha llevado a la necesidad de realizar un replanteo sobre dicha situación y hacer un marcha atrás.

Por otro lado, la propia industria de la construcción siempre ha sido considerada como generadora de una gran cantidad de residuos, al mismo tiempo que posee una larga tradición en cuanto a la capacidad de reutilizar no solamente sus propios residuos sino también los residuos de otras industrias. Esta capacidad de recuperación es precisamente lo que es necesario promover en nuestra sociedad.

Factores como la escasez de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente la preservación del medio ambiente, con la consecuente necesidad de disposición de los residuos, han llevado a la búsqueda de nuevas opciones para el reciclado de materiales de desecho en el campo de la Ingeniería Civil. Así es que desde hace más de 50 años se comenzara con los estudios sobre el reciclaje de materiales de desecho de la construcción a fin de determinar su comportamiento resistente y durable, ya que el empleo de los mismos se había limitado generalmente a elementos carentes de solicitaciones resistentes importantes.

En el mercado actual de consumo, se observa por un lado la presión de los ecologistas y una creciente concientización de la población respecto a la necesidad de reciclar los materiales que han cumplido su vida útil. Esta política presenta grandes atractivos frente a la utilización de materias primas naturales, siendo la ventaja más destacada que se soluciona al mismo tiempo la problemática originada en la eliminación de subproductos de desecho y que mediante el uso de estos residuos se obtiene una nueva materia prima, que en el caso de los hormigones son los agregados, reduciendo de esta forma una cantidad considerable de recursos naturales primarios a extraer.

El uso de hormigón triturado como agregado, conocidos habitualmente como agregados reciclados, para la elaboración de nuevos hormigones aparece como una alternativa importante, particularmente en regiones densamente pobladas o con escasos recursos naturales. El reciclado de materiales de construcción, impensable hasta hace algunos años, es hoy en día una de las actividades con mayores perspectivas de crecimiento.

Aunque diversos estudios han demostrado la factibilidad del empleo de agregados reciclados, en la mayoría de los casos su aplicación fue orientada, como ya ha sido mencionado, a la elaboración de hormigones de baja calidad. Tal es así que la mayoría de los investigadores coinciden en que los agregados reciclados pueden utilizarse sin mayores precauciones en aquellos casos que no existan demandas de grandes niveles de resistencia (fundaciones, estructuras con cargas menores, etc.).

Sin embargo el mayor conocimiento de sus propiedades ha conducido a que su uso se generalice, dando lugar a hormigones reciclados con niveles de resistencia, durabilidad, etc. similares a los exigidos para los hormigones elaborados con agregados naturales de densidad normal.

Los hormigones elaborados con agregados reciclados serán preferidos cuando existan normativas que permitan su evaluación y control, cuando haya escasez de agregados naturales o bien cuando surjan leyes que prohíban la disposición de materiales de desecho en cualquier sitio. Con relación a lo primero, se debe mencionar que desde el año 2016, la norma IRAM 1531 contempla la evaluación de un agregado grueso mixto conformado por un mínimo de 80% de agregado grueso natural y hasta un máximo de 20% de agregado grueso reciclado, este último proveniente de residuos de hormigón. El agregado grueso mixto debe cumplir con los mismos requisitos exigidos a los agregados gruesos naturales para poder ser empleados en la elaboración de hormigones con fines estructurales. Además, en dicha normativa se especifica que los hormigones reciclados a elaborar deberán ser de un nivel resistente máximo de 40 MPa.

En muchos casos, como en nuestro país, la utilización de materiales de desecho en la construcción es prohibitiva debido al poco conocimiento que se tiene sobre ellos y a la inexistencia de normativas y/o especificaciones sobre calidad, para hacer que los productos que se comercialicen tengan propiedades acordes a sus necesidades, hecho que puede lograrse mediante un adecuado tratamiento y una correcta gestión, reduciendo así las cantidades de materiales de desecho y poder aprovechar el potencial que estos tienen como material secundario.

La utilización de los materiales de desecho de la construcción puede ser muy diversa, aunque va a depender de la demanda del mercado y de los métodos de obtención. En una demolición masiva, sin ninguna clasificación previa (salvo los materiales metálicos y los orgánicos) se pueden obtener materiales adecuados para obras como caminos, terraplenes, bases, etc., mientras que en una demolición selectiva, en donde se trituran y clasifican los hormigones de desecho, se pueden obtener agregados idóneos para la ejecución de

nuevos hormigones que pueden ser empleados en elementos estructurales.

El proceso ideal en la construcción de una estructura de hormigón, concebida desde el proyecto hasta la demolición, debería seguir el siguiente procedimiento: Construir para demoler, demoler para reciclar, reciclar para construir, un proceso que si se cumpliese con rigor prácticamente no se producirían residuos.

RECICLADO DE HORMIGONES

Existen diferentes métodos y sistemas para la remoción del hormigón, incluyendo desde grandes equipos, en general autopropulsados, utilizados para las principales tareas de demolición hasta diferentes tipos de herramientas de mano (neumática, hidráulica, eléctrica, a combustible) empleadas para trabajos menores [1]. Cualquiera de estos métodos tiene por finalidad reducir el tamaño de los bloques de hormigón de manera de lograr un tamaño acorde con el medio de transporte disponible y/o con la abertura de boca y tipo de trituradora que se empleará para la obtención de los agregados reciclados.

Las plantas de producción de agregados reciclados son similares a las de producción de agregados primarios, y pueden operar mediante sistemas abiertos o cerrados [1]. Estos sistemas están compuestos por un conjunto de trituradoras y tamices dispuestos en serie, permitiendo ejercer un mayor control sobre las características del material producido como así también la separación del mismo en distintas fracciones. El nivel de complejidad de la planta lo define el grado de contaminación que presente el residuo y la aplicación final que tendrá el nuevo material obtenido.

El proceso de reciclaje de hormigones consiste básicamente en las operaciones de preclasificación del residuo, trituración y clasificación final del material, tendiendo de esta forma a la obtención de productos similares a los agregados naturales que se comercializan. De este modo es posible obtener agregados grueso y fino reciclados (AGR y AFR).

Los agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones presentan a simple vista características diferentes a las de los agregados naturales (Figura 1). Mientras que en los agregados naturales dichas características dependen en primera instancia de las características de la roca madre, en los agregados reciclados dependerán de las características de la roca pero también del mortero del hormigón original, siendo importante las cantidades relativas en que se presentan cada uno de ellos.

Figura 1. Características de los agregados reciclados [2].

Estas características del agregado reciclado hacen que sea un material heterogéneo, constituido por dos fases: mortero y roca, las que poseen propiedades diferentes, siendo la porosidad del mortero la más importante, ya que modifica otras propiedades como la densidad, absorción de agua, resistencia, dureza, durabilidad, etc.

El mortero presente en las partículas de los agregados reciclados produce en los mismos una textura superficial más rugosa y porosa que la del agregado natural. Esta característica distintiva hace que el empleo de agregados reciclados en la elaboración de hormigones produzca modificaciones en las propiedades de las mezclas, como por ejemplo que absorban parte del agua de mezclado en aquellos casos en que se los utilice en estado seco, hecho que está en función directa con el porcentaje en que se los emplee.

Por tal motivo, para obtener una determinada trabajabilidad prefijada del hormigón existen distintas alternativas a considerar:

— Cuantificar la cantidad de agua adicional que se debe agregar al hormigón durante el mezclado mediante ensayos previos.
— Utilizar el agregado reciclado en estado saturado.
— Utilizar un aditivo superfluidificante.

Propiedades de los agregados reciclados

En general, se indica que la granulometría del agregado grueso reciclado es independiente de factores tales como el nivel resistente del hormigón de origen [3-4] y de la edad del hormigón al momento de la trituración [5-6]. Además, las granulometrías obtenidas mediante el empleo de trituradoras de mandíbulas se encuentran en su mayor parte dentro de los límites especificados en las normativas [7-8]. En la Figura 2 se presenta el intervalo de distintas granulometrías de AGR de diferentes características en relación a los límites granulométricos especificados en la normativa nacional.

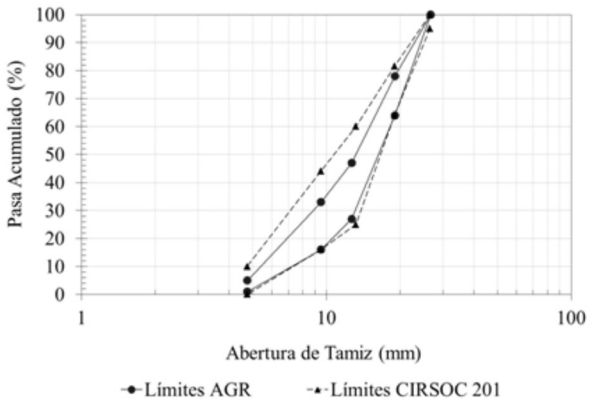


Figura 2. Intervalo de granulometrías de AGR en relación a los límites de la normativa nacional. (Adaptado de [9])

En el caso del agregado fino reciclado (AFR), su granulometría y por tanto su módulo de finura resulta superior al de un agregado fino natural, motivo por el cual en la mayoría de los casos las curvas granulométricas no se encuentran dentro de los límites establecidos por las normas para las arenas naturales, o bien haciéndolo sólo en parte [8]. En la Figura 3 se presentan las granulometrías de diferentes tipos de AFR y sus correspondientes agregados finos de trituración.

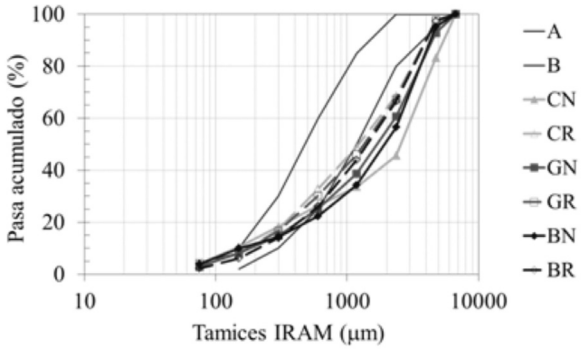


Figura 3. Granulometrías de agregados finos de trituración y de los AFR [10].

Considerando las características antes mencionadas de los agregados reciclados de hormigón, debe indicarse que los mismos presentan una elevada absorción de agua y una menor densidad en comparación con el propio agregado natural que contienen. A modo de ejemplo puede mencionarse que en el caso de agregados gruesos reciclados provenientes de hormigones que habían sido elaborados con piedra partida granítica, los mismos presentaron una absorción de agua comprendida entre un 4% y 5,5%, y la densidad alcanzó valores entre 2,43 y 2,48 (Figuras 4 y 5). En la Figura 6 se comparan los valores promedio de ambos parámetros en los AGR con los correspondientes al agregado grueso natural (AGN), el cual presentaba una absorción de 0,4% y una densidad de 2,65. Esta mayor absorción de agua y menor densidad que poseen los agregados reciclados están directamente relacionadas con el contenido de mortero presente en sus partículas. Estas dos características de los agregados gruesos reciclados son las que tienen mayor incidencia al momento de elaborar los hormigones reciclados.

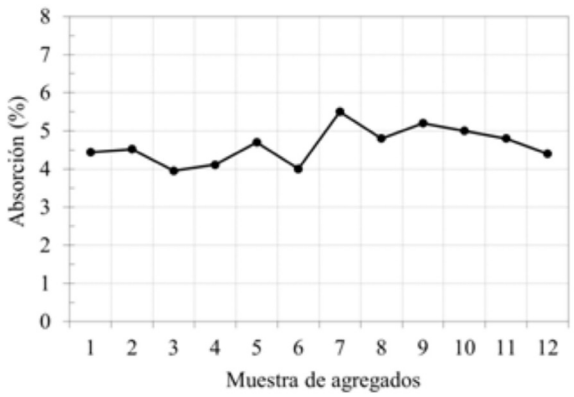


Figura 4. Absorción en distintas muestras de AGR (Adaptado de [9])

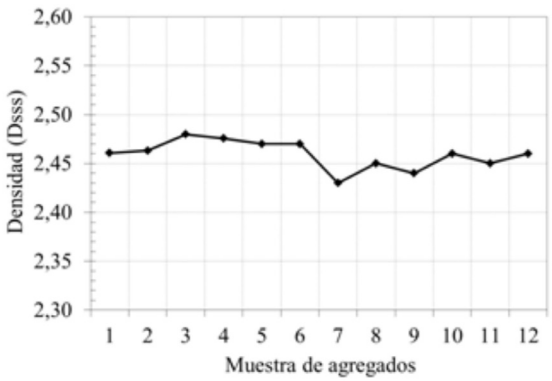


Figura 5. Densidad en distintas muestras de AGR (Adaptado de [9])

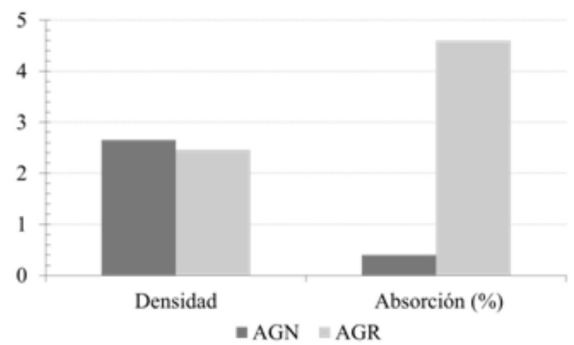


Figura 6. Absorción y densidad del AGR y del AGN (Adaptado de [9])

Las diferencias mencionadas para la fracción gruesa se observan también en el agregado fino reciclado (AFR). En la Figura 7 se presentan las densidades de tres agregados finos naturales de trituración y la correspondiente a los AFR de cada tipo. En todos los casos, la densidad de los AFR resulta menor que la del respectivo agregado natural, evidenciándose una mayor disminución de la misma cuanto mayor es la densidad del agregado natural. En la Figura 8 se presentan las absorciones de los mismos tres AFR en comparación con la del correspondiente agregado fino natural de trituración. Al igual que en la fracción gruesa, las diferencias observadas en la fracción fina son consecuencia del mortero presente en sus partículas.

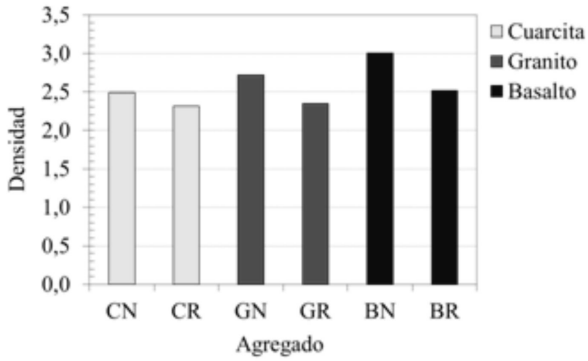


Figura 7. Densidad de AFR con distintos tipos de agregado natural [10].

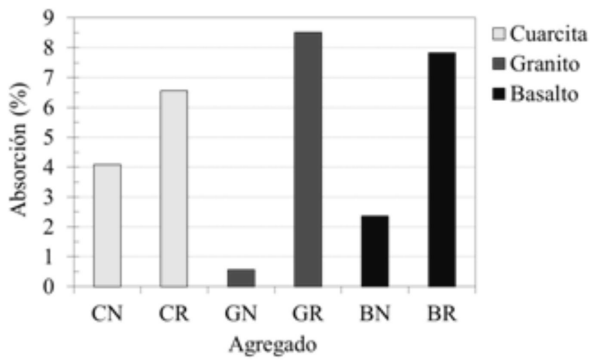


Figura 8. Absorción de AFR con distintos tipos de agregado natural [10].

Resistencia a compresión y Módulo de Elasticidad Estático

Considerando que la resistencia a compresión del hormigón es una de las características que mejor lo representa, la cual asimismo se encuentra relacionada con otras propiedades del hormigón en estado endurecido, puede indicarse que los hormigones reciclados presentan un comportamiento similar al de los hormigones convencionales elaborados con el mismo tipo de agregado grueso natural. En la Figura 9 se presenta la relación entre la resistencia a compresión (f'c) y la razón agua-cemento obtenida para hormigones reciclados y convencionales de tres niveles resistentes diferentes, en la cual puede observarse el comportamiento antes mencionado.

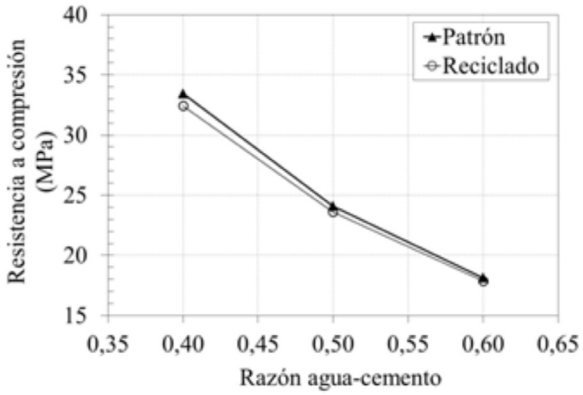


Figura 9. Relación entre la resistencia a compresión de hormigones con AGR y la razón agua-cemento [11]

En la Figura 10 se presentan los valores de resistencia a compresión obtenidos en hormigones convencionales y reciclados, en los cuales se utilizaron diferentes porcentajes de agregados gruesos reciclados en reemplazo del agregado grueso natural.

Puede observarse que por ejemplo para la razón agua-cemento 0,50, la resistencia a compresión de los hormigones reciclados con un 25% de agregado grueso reciclado fue superior a la del hormigón convencional. Para porcentajes de reemplazo de hasta un 75% las resistencias fueron prácticamente similares, produciéndose una caída del 20% cuando se reemplazó el 100% del agregado grueso natural (AGN) por el reciclado. Estos resultados corresponden en todos los casos a hormigones en los cuales el AGN empleado fue un agregado granítico de trituración.

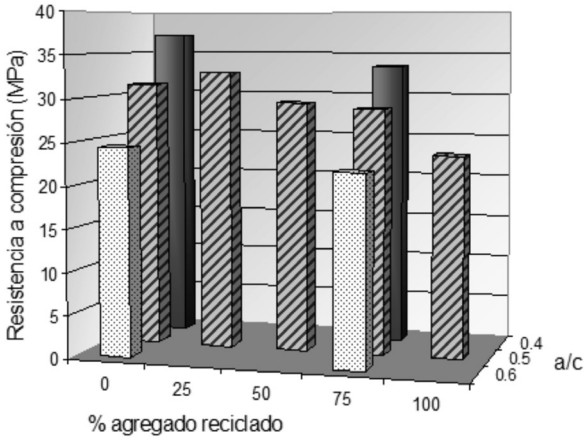


Figura 10. Resistencias a compresión determinadas en hormigones convencionales y reciclados [12]

En la Figura 11 se presentan resultados de resistencia correspondientes a hormigones convencionales y reciclados de dos niveles resistentes y elaborados con rodado silíceo, para diferentes porcentajes de reemplazo del mismo por AGR. Dicho agregado reciclado se obtuvo de la trituración de hormigones elaborados con el mismo rodado silíceo natural. Se observa un leve incremento de la resistencia conforme aumenta el contenido de AGR empleado, hecho que se encuentra relacionado con las diferencias que existen entre los agregados naturales y reciclados utilizados, principalmente en lo referido a la textura superficial y la forma de sus partículas, siendo en el natural lisas y redondeadas y en el reciclado rugosas y de forma irregular.

Con relación a la incidencia del AFR sobre la resistencia a compresión del hormigón, cabe señalar que los datos relevados de la bibliografía dan cuenta que hasta 30% de reemplazo los niveles

resistentes resultan similares al de hormigones elaborados con agregados naturales [14]. En tal sentido, en la Figura 12 se presentan resultados de estudios llevados a cabo en el LEMIT, en la cual se puede observar un leve incremento de la resistencia a compresión del hormigón conforme aumentó el reemplazo de agregado fino natural por AFR. En la Figura 13 se presenta la relación entre la resistencia a la compresión de hormigones convencionales y reciclados, elaborados con 20 y 40% de AFT o AFR respectivamente, y la razón agua-cemento, observándose similar comportamiento en ambos tipos de hormigones.

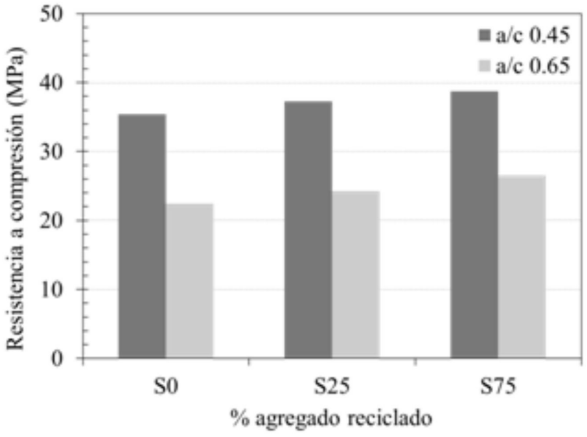


Figura 11. Variación de la resistencia a compresión con el contenido de AGR en hormigones con rodado silíceo. (Adaptado de [13])

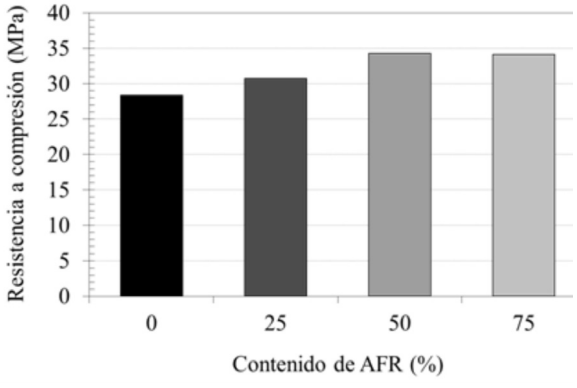


Figura 12. Resistencia a compresión de hormigones con contenidos variables de AFR [15].

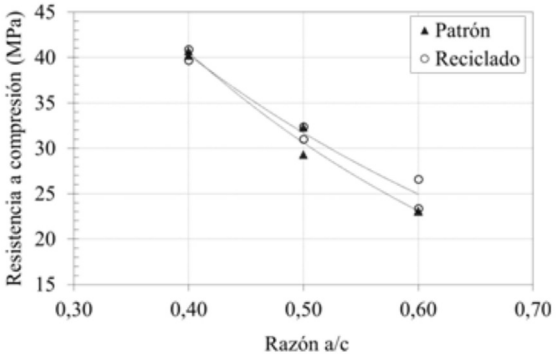


Figura 13. Relación entre la resistencia a compresión de hormigones con AFR y la razón agua-cemento. (Adaptado de [16])

En lo que respecta al módulo de elasticidad estático, parámetro de importancia para el cálculo estructural, debe indicarse que al evaluar hormigones de diferentes razones agua-cemento elaborados con agregados gruesos reciclados, y para distintos porcentajes de reemplazo, el módulo obtenido fue inferior al de los hormigones convencionales, hecho que debe ser atribuido a la existencia del mortero que poseen los agregados reciclados, el cual tiene un módulo de elasticidad menor que el de la roca (Figura 14). Este hecho se hace más notorio a medida que se utiliza mayor cantidad de agregado grueso reciclado (Figura 15). En el caso de hormigones con AFR, dicha apreciación no fue observada, presentando los hormigones con hasta 40% de AFR módulos de elasticidad similares al de los hormigones de referencia (Figura 16).

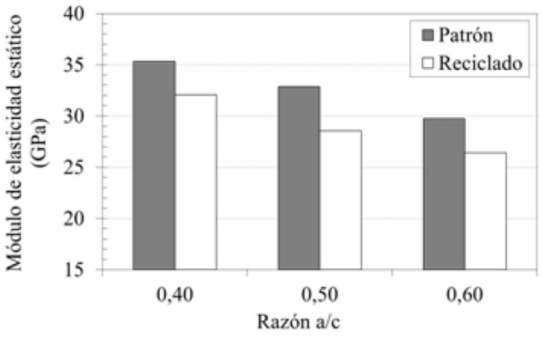


Figura 14. Relación entre el módulo de elasticidad estático de hormigones con AGR y la razón agua-cemento [17].

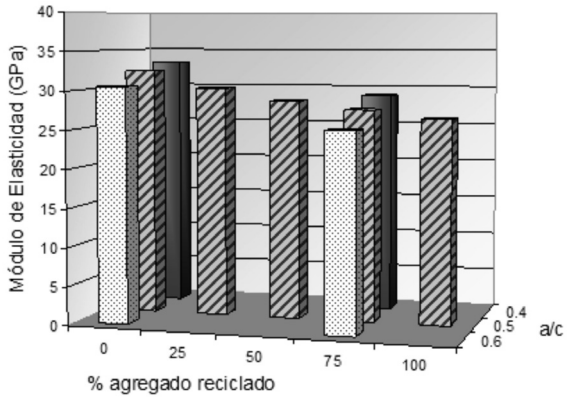


Figura 15. Módulos de elasticidad determinados en hormigones convencionales y reciclados [12].

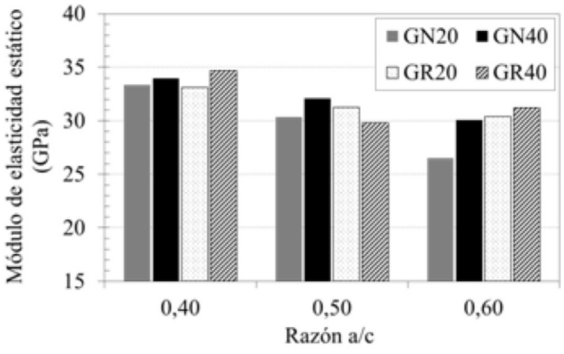


Figura 16. Variación del módulo de elasticidad con la razón a/c de hormigones con AFR (Adaptado de [16])

CONSIDERACIONES FINALES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las investigaciones llevadas a cabo hasta el presente en el LEMIT, puede indicarse que para el caso de elementos estructurales podrán utilizarse hormigones reciclados elaborados con hasta un 30% de agregado reciclado, grueso o fino, para lo cual será necesario realizar un control riguroso de las propiedades de los materiales a utilizar. Este hecho conducirá a la obtención de hormigones reciclados con niveles de resistencia y deformabilidad similares a los exigidos para los hormigones elaborados con agregados naturales de densidad normal. En aquellos casos en que las exigencias estructurales sean mínimas y no existan problemas de durabilidad, podrán utilizarse mayores contenidos de agregados reciclados, pudiendo llegar hasta un 100% en el caso de agregado grueso reciclado.

La tendencia de utilizar hormigones reciclados es la solución al problema de un exceso de hormigones de desecho. A este hecho debe adicionarse una reducción en los costos de elaboración, ya que en la mayoría de los casos la generación de estos residuos se produce en el mismo lugar donde serán reutilizados, además de conservar materia prima no renovable. Para que el empleo del agregado reciclado redunde en beneficios ambientales y económicos, es indispensable una cuantificación de ambos factores, ya que no siempre el empleo de materiales reciclados conllevará a reducir el impacto ambiental o a una reducción en los costos.

REFERENCIAS

1.- ACI Committee 555, 2002. Removal and reuse of hardened concrete. Materials Journal, ACI, Nº 99-M31, pp. 300-323.

2.- Vázquez, E., Barra, M., 2002. Reciclaje y reutilización del hormigón. Monografía CIMNE: Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón, Nº 67, pp. 43-65.

3.- Hansen, T.C., Narud, H., 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International, Vol. 5, Nº 1, pp. 79-83.

4.- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1985. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of Concrete Research, Vol. 37, Nº 130, pp. 29-38.

5.- Katz, A., 2003. Properties of Concrete made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 33, Nº 5, pp. 703-711.

6.- Buttler, A.M., 2003. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Tesis de Magíster, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 199p.

7.- Hansen, T.C., 1986. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second State-of-the-art. Report developments 1945-1985. RILEM Technical Committee-37-DRC, Demolition and Recycling of Concrete. Materials and Structures, Vol. 19, Nº 111, pp. 201-246.

8.- Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R., 2002. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. Materials and Structures, Vol. 35, Nº 252, pp. 504-509.

9.- Zega, C.J., 2008. Hormigones Reciclados: Caracterización de los Agregados Gruesos Reciclados. Tesis presentada para el grado de Magister en Tecnología y Construcciones de Hormigón, Facultad de Ingeniería, UNCPBA, 108p.

10.- Zega, C., Sosa, M.E., Di Maio, A., 2010. Propiedades de los agregados finos reciclados procedentes de hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados gruesos naturales. En: Memorias IV Congreso Internacional y 18º Reunión Técnica de la AATH, Mar del Plata, 8-11 de octubre de 2010, pp. 33-38.

11.- Zega, C.J., Di Maio, A.A., 2003. Influencia de las Características de los Agregados Reciclados en la Elaboración de Hormigones. En: Memorias 15º Reunión Técnica de la AATH, Santa Fe, 21-24 de octubre de 2003. (Editado en CD)

12.- Di Maio, A., Giaccio, G., Zerbino, R., 2002. Hormigones con agregados reciclados. Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, Nº 9, pp. 5-10.

13.- Zega, C.J., Di Maio, A.A., 2012. Influencia del tipo de agregado grueso natural sobre algunas propiedades de los hormigones reciclados. En: Memorias V Congreso Internacional y 19º Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca, 7-9 de noviembre de 2012, pp. 151-158.

14.- Sosa, M.E., 2018. Estudio de la contracción por secado en morteros y hormigones elaborados con agregados finos reciclados. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNLP, 240p.

15.- Zega, C.J., Di Maio, A.A., 2006. Comportamiento de Hormigones Elaborados con Agregado Fino Reciclado. En: Memorias 16º Reunión Técnica de la AATH, Mendoza, 8-10 de noviembre de 2006, pp. 47-54.

16.- Sosa, M.E., Zega, C.J., Di Maio, A.A., 2015. Influence of fine recycled aggregate on compressive strength, static modulus of elasticity and drying shrinkage of concretes". En: Memorias Conferencia

Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible, La Plata, Argentina, 15-18 de septiembre de 2015, PP. 311-319.

17.- Zega, C.J., Di Maio, A.A. 2007. Efecto del Agregado Grueso Reciclado sobre las Propiedades del Hormigón. Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME, Vol. 45, Nº 2, pp. 1-11.

DURABILIDAD DE HORMIGONES CON AGREGADOS RECICLADOS

DURABILITY OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETES

L.R. Santillána[1]

[1] *Becario Doctoral CONICET, LEMIT. lautarorsantillan@gmail.com*

RESUMEN

En los últimos años, se ha extendido la utilización de agregados reciclados (AR) para la elaboración de nuevos hormigones, dado que resulta una práctica sustentable con el medio ambiente y, en determinadas condiciones, una solución económica. En algunas regiones del mundo su utilización en la producción de hormigón estructural ya se encuentra normalizada, mientras que en otras existe aún una gran preocupación por parte de los profesionales al momento de cumplir con los requisitos de durabilidad. Aunque existen numerosas investigaciones que dan cuenta de las adecuadas propiedades mecánicas del hormigón reciclado (HR), los aspectos durables de este material no están del todo comprendidos. Existen diversas patologías o tipos de ataque vinculados con la durabilidad de un hormigón, y en cada uno de ellos las propiedades del AR pueden influir de manera particular y diferente. Resulta fundamental conocer de qué manera el AR modifica las propiedades durables del HR, a fin de tomar en cada caso los recaudos necesarios para elaborar un hormigón reciclado con prestaciones durables satisfactorias.

Palabras clave: *Durabilidad; Hormigón reciclado; Agregados reciclados.*

ABSTRACT

In the last years, the use of recycled aggregates for new concrete production has increased, as it is a sustainable practice and, in some cases, an economical solution. In some regions of the world, its use for structural concrete production is already standardized, whereas in other regions there is still a general concern by concrete producers when they have to fulfill durable requirements with this material. Although many publications are confirming adequate mechanical properties of recycled concrete, the durable performance of this material is not totally understood. There are several specific pathologies or types of attack in relation with concrete durability, and in each case, recycled aggregate properties can

play a different role. It is important to understand how recycled aggregates modify the durable properties of recycled concrete, to take specific provisions at the moment of designing a recycled concrete with satisfactory durable performance.

Keywords: *Durability; Recycled concrete; Recycled aggregates.*

INTRODUCCIÓN

El uso de agregados reciclados (AR) provenientes de la trituración de hormigón residual es una práctica creciente en la actualidad, particularmente en países con estrictas políticas ambientales. Por un lado se reduce el volumen de desechos de demolición destinados normalmente a los vertederos, mientras que por otro lado se reduce el impacto ambiental de la construcción al disminuir el consumo de depósitos naturales de agregados y la explotación de canteras.

Los ARs tienen características diferentes a las de los agregados naturales (AN), principalmente debido a la presencia de mortero adherido en sus partículas [1–4]. De esta forma, mientras las propiedades del AN dependen de las características de la roca de origen, las propiedades del AR están relacionadas con el AN utilizado y las características propias del hormigón de origen [5–7]. Existe un consenso general de que los AR tienen propiedades desfavorables en relación a los AN, como menor densidad, menor resistencia al congelamiento, menor resistencia a la abrasión, mayor contenido de material fino y mayor absorción. Como resultado, las dosificaciones y las propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (HR) pueden variar de las de un hormigón con agregados naturales (HN) si las mismas no son tenidas en consideración [8–13].

La influencia del AR en las propiedades mecánicas del HR ha sido estudiada ampliamente. En general, se señala que reemplazos de hasta un 30% de AR en lugar de AN no producen cambios significativos en las propiedades mecánicas del nuevo hormigón [6,10,14–16]. Sin embargo, algunos estudios han indicado que reemplazos de hasta un 75% no producen cambios significativos en las propiedades del HR [17–19].

En cuanto al desempeño durable de los HR, existen discrepancias y resultados contradictorios en la bibliografía existente. Esto puede estar relacionado con los efectos opuestos que tiene el AR en la estructura de poros y en los mecanismos de transporte del nuevo hormigón: mientras que por un lado puede generar mejoras en la zona de interfaz agregado-mortero nuevo [20], por otro lado aumenta la porosidad total del nuevo hormigón, al aumentar el contenido relativo de mortero [21]. Además, las propiedades del hormigón de origen (como nivel resistente, tipo de cemento, tipo de AN, etc.) pueden modificar significativamente los efectos que el AR tenga en el desempeño durable del nuevo hormigón, dependiendo del mecanismo de degradación y de las condiciones de exposición. Este trabajo recompila datos existentes en la literatura, e incluye resultados experimentales propios, que apuntan a comprender los mecanismos durables de los HR bajo distintos entornos agresivos, como la permeabilidad a los cloruros, el ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice, congelamiento y deshielo, y exposición a altas temperaturas.

DESARROLLO

- Permeabilidad a los cloruros

El problema de durabilidad vinculado al ingreso de cloruros, afecta en realidad al acero del hormigón armado y no al hormigón en sí. A determinada concentración de iones cloruro en las inmediaciones de la armadura, se produce la despasivación de la misma y comienza el proceso de corrosión. El hormigón resulta entonces en una

protección para las armaduras frente al ataque de los cloruros. La tasa de ingreso de cloruros en un hormigón está gobernada principalmente por la porosidad del mismo: a mayor porosidad, mayor es la tasa de ingreso de cloruros. Sin embargo, el hormigón tiene otra propiedad que influye en este proceso, que es la capacidad de fijación de iones cloruro. Una parte de los iones que ingresan en la matriz del hormigón son fijados por la pasta de cemento del mismo, quedando inhabilitados para atacar a la armadura, por lo que una mayor capacidad de fijación de iones cloruro, a igualdad de otros factores, se traduce en una mayor resistencia del hormigón a la penetración de los cloruros [22–24].

El reemplazo de AN por AR aumenta la porosidad del HR debido al mortero adherido en sus partículas [21], por lo que en principio aumentarían la tasa de ingreso de los iones cloruro. Por otro lado, el mayor contenido de pasta de cemento que aporta el AR representaría una mayor capacidad de fijación [24], lo cual resulta en una propiedad positiva. Aunque existen numerosos estudios que evalúan la resistencia del HR a la penetración de cloruros, no existe un consenso absoluto respecto a la influencia del AR. Varios autores señalan que el uso de AR redujo levemente la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros [5,20,25,26], mientras que otros señalan que no se observaron diferencias entre el HN y HR [27,28]. La Figura 1 muestra una compilación de resultados de diferentes estudios. Se observa una caída de la resistencia al ingreso de cloruros al aumentar el contenido de AR, pero una influencia mucho mayor de la relación agua-cemento (a/c) o de la utilización de materiales cementicios suplementarios (MCS).

La permeabilidad a los cloruros de un hormigón puede determinarse midiendo el contenido de cloruro a distintas profundidades (perfil de ingreso) en probetas inmersas en solución durante determinados periodos de tiempo. A partir de ello es posible la determinación del coeficiente de difusión aparente de cloruro. También puede evaluarse indirectamente por métodos acelerados de migración de cloruros, como el especificado por la norma ASTM C1202 [29]. La mayoría de los autores que han estudiado la resistencia a la penetración de cloruros en HR han utilizado métodos acelerados. El problema con estos tipos de ensayos es que se realizan en periodos cortos de tiempo, y no dan tiempo para que se produzca la fijación de los iones cloruro en la matriz de cemento. Esto resulta en una subvaloración de la resistencia a los cloruros por parte de los HR, que por tener mayor contenido de pasta de cemento pueden tener mayor capacidad de fijación. Además, los métodos utilizados en condiciones de laboratorio no representan exactamente las condiciones a las que son expuestas las estructuras reales, que en general tienen estados de saturación parcial y no total, y en éstas juegan un papel importante otros factores como el viento, lluvias, presencia de sulfatos y variación de las concentraciones. Por ejemplo, Villagrán et al. [28] evaluaron hormigones con AN y AR expuestos a condiciones reales de ambiente marino, y a determinados periodos de tiempo realizó perfiles de ingreso de cloruros solubles en agua y totales. Encontraron que para relaciones a/c iguales o superiores a 0,40, no hubo diferencias entre el contenido de cloruro de las probetas de HN y las de HR, mientras que para hormigones con relación a/c menores a ese valor el uso de AR aumentaba notablemente la tasa de penetración. Además, pudieron comprobar una mayor capacidad de fijación de los hormigones con AR.

Zega et al. [30], por su parte, estudiaron la permeabilidad a los cloruros de hormigones reciclados con distintas relaciones a/c y diferentes contenidos de AR, y estos a su vez provenían de hormigones elaborados con distintos tipos de AN (graníticos, basálticos y cuarcíticos, obtenidos por trituración de rocas, y agregados silíceos de tipo canto rodado). Luego de exponer estos hormigones por 140 días a una solución de 50g/l de cloruro de sodio, se realizaron perfiles de ingreso de cloruros solubles y totales. Se encontró que el contenido de AR tuvo una influencia mucho menor a la relación a/c del HR. Además se observó una influencia muy

baja del contenido de AR, teniendo inclusive en algunos casos menor permeabilidad a los cloruros que los hormigones de control: en hormigones con AR de base cuarcítica y silícea. Esto puede deberse a que la absorción de agua por parte de los AR modifique la relación a/c efectiva en el nuevo hormigón, al haberlos empleado en estado de humedad secos al aire, y a la mejora en la interfase que puede producirse por el uso de los mismos.

Varios autores han demostrado que el uso de algunos materiales cementicios suplementarios (MCS), como ceniza volante o escoria de alto horno, que tienen la capacidad de incrementar la tortuosidad de la red capilar de la pasta de cemento por efecto de la reacción puzolánica, permite obtener HR con resistencia a la penetración de cloruros aún mayores que hormigones similares con AN [31,35,36]. Otzuki et al. [20] demostraron que la técnica de "doble mezclado" mejora la resistencia a los cloruros del HR, dado que mejora la calidad de las interfaces, especialmente en hormigones con elevada relación a/c.

- Ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos se refiere específicamente al daño generado por productos expansivos generados en el interior del hormigón por una reacción química entre algunos compuestos de la pasta de cemento hidratada e iones sulfatos que provienen del exterior (ataque externo por sulfatos) [37]. Al igual que la mayoría de los problemas vinculados a la durabilidad, el ataque externo por sulfatos (AES) se encuentra fuertemente gobernado por la porosidad del hormigón, donde los iones sulfato penetran en el hormigón por el fenómeno de difusión. Por otro lado, es posible controlar el AES utilizando cementos de cuya hidratación resulte poca cantidad de compuestos reactivos con el sulfato (cementos con bajo contenido de C_3A, y con baja relación C_3S/C_2S). En este caso, el uso del agregado grueso reciclado (AGR) presenta entonces un doble problema: por un lado incrementa la porosidad, aumentando la tasa de ingreso de iones sulfato; por otro lado, el contenido de productos de hidratación del cemento resulta mayor, pudiendo aumentar la disponibilidad de compuestos capaces de reaccionar con los iones sulfato.

La bibliografía sobre HR expuestos a este tipo de ataque es muy escaza, por lo que aún se dista de lograr obtener una comprensión de la influencia

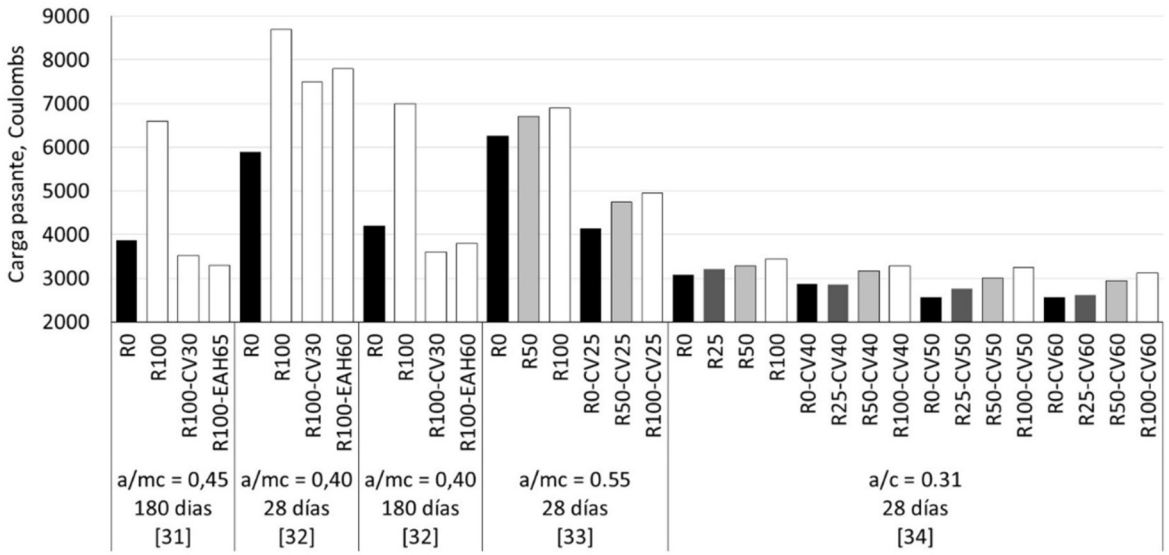


Figura 1. Incidencias de la relación a/c, contenido de AR y utilización de MCS en el ingreso de cloruro, evaluado con el ensayo ASTM C1202 [31–34].

que el AR tiene en el desarrollo del ataque. Este hecho es debido en parte al gran número variables intervinientes, tales como tipo de cemento, porosidad general, concentración de sulfatos, catión asociado, temperatura, forma de las probetas, condiciones de ensayo, entre otras, a las cuales se deben sumar las características propias del AR, principalmente el tipo de cemento y la porosidad de la pasta adherida. Además, se debe considerar que aún no existen procedimientos normalizados para evaluar la resistencia del hormigón con agregados naturales al ataque por sulfatos, encontrándose una gran variedad de posibilidades como la determinación de la expansión, cambio de peso, modificación del módulo de elasticidad dinámico, valoración de la resistencia mecánica, etc. A lo mencionado anteriormente se debe agregar la falta de reciprocidad de los métodos de ensayo empleados en laboratorio, los cuales generalmente consideran elevadas concentraciones de sulfato y un estado de saturación permanente, con el desempeño de los hormigones en estructuras reales, donde el estado de saturación es parcial y las concentraciones son variables en el tiempo. Estas últimas son condiciones óptimas para el desarrollo del ataque físico por cristalización de sales, en contraposición a las de los métodos de laboratorio que representan condiciones para un ataque netamente químico.

Con relación al desempeño de los HR expuestos en sulfatos, algunos autores han observado una resistencia levemente menor que la del hormigón con agregados naturales [32,38–41]. Dhir et al. [39] estudiaron hormigones con diferentes contenidos de AGR, y encontraron que hasta un 30% de uso de AGR las expansiones resultaron similares a las del hormigón de control. Vale aclarar que estos resultados corresponden a hormigones con baja resistencia (elevada relación a/c), bajas concentraciones de sulfato (0,3 g/l) y en cuya elaboración se emplearon materiales cementicios suplementarios. Bulatovi et al. [40] evaluaron hormigones con 100% de AGR, en los cuales utilizaron diferentes tipos de cemento (ARS y normal), distintas relaciones a/c y diferentes tipos de sales de sulfato (de sodio y de magnesio). Encontraron una influencia negativa considerable del AGR solo en los hormigones con cemento Portland normal y elevada relación a/c, mientras que en los restantes hormigones no detectaron expansiones mayores ni caídas considerables en la resistencia mecánica, luego de 1 año de exposición. La Figura 2 compila resultados informados en la literatura con relación al desempeño de probetas de hormigón reciclado expuestas a solución de sulfato de sodio.

En otros estudios se ha evaluado el comportamiento de morteros con agregado fino reciclado (AFR), lo que se traduce en menores tiempos de evaluación. Lee [42] y Lee et al. [43] han ensayado morteros con distintos contenido de AFRs de distinta absorción, expuestos a soluciones de sulfato de sodio y de magnesio al 5% durante 1 año. Por un lado, informan mayor expansión en los morteros elaborados con AFR de mayor absorción. Por otro lado, encontraron que los morteros con reemplazos de hasta un 50% de AFR presentaron expansiones menores que las del mortero de control, mientras que para reemplazos superiores al 50% las expansiones fueron mucho mayores a las del mortero de control, llegando al máximo valor para un reemplazo de 100%. Un comportamiento similar al mencionado anteriormente fue encontrado por Santillán et al. [44] al evaluar morteros elaborados con distintos tipos de cementos y con 0, 30 y 50% de reemplazo del AN por AFR. También contempló el empleo de probetas con dos relaciones de distinta esbeltez expuestas en solución de sulfato de sodio (50 g/l) durante 1 año. Encontraron una influencia nula del contenido de AFR para morteros con cemento de bajo contenido de C_3A, mientras que para morteros con cemento de elevado C_3A se observó una influencia negativa del contenido de AFR, pero no en forma proporcional: en las barras poco esbeltas, observaron mayor expansión a mayor contenido de AFR, mientras que en las barras más esbeltas observaron mayor expansión para un 30% de AFR, presentando el mortero con 50% de AFR una expansión similar a la del mortero de control. Una hipótesis para explicar este comportamiento

radica en el doble efecto que tiene la porosidad aportada por el AFR: por un lado aumenta la tasa de penetración de iones sulfato acelerando el ataque, mientras que por otro lado ofrece mayor espacio para la deposición de productos de reacción, retrasando la generación de tensiones internas y la consecuente expansión (menor restricción interna). La forma de la probeta, la temperatura y la concentración son parámetros que influyen en la cinética del AES [45,46], pero el uso de AFR introduce nuevas variables que afectan a la cinética del ataque mediante su influencia en la restricción interna, y cuya participación no ha sido aún del todo comprendida.

El uso de MCS mejora notablemente la resistencia al ataque por sulfatos del HR, logrando en muchos casos mejor desempeño que el hormigón de referencia [38,41,48]. Esto se debe a que la actividad puzolánica de los MCS disminuye fuertemente la porosidad de la matriz, reduciendo la tasa de ingreso de iones sulfatos, mientras que por otro lado consume la portandita disponible para reaccionar con el sulfato para generar yeso. También existen algunos estudios que emplean AR pre-tratado, embebiéndolos en soluciones concentradas con cemento, distintos MCS, e inclusive con compuestos no tradicionales de la industria del hormigón. Estos informan un mejor desempeño de las mezclas con AR pre-tratado, alcanzando desempeños similares a los de un hormigón de AN frente al ataque por sulfatos [47,49].

Como fuera mencionado anteriormente, en la gran mayoría de las estructuras reales, los hormigones se encuentran sometidas a estados de saturación parcial y variable, lo que genera las condiciones propicias para la cristalización de sales y en consecuencia un ataque físico, que se combina con

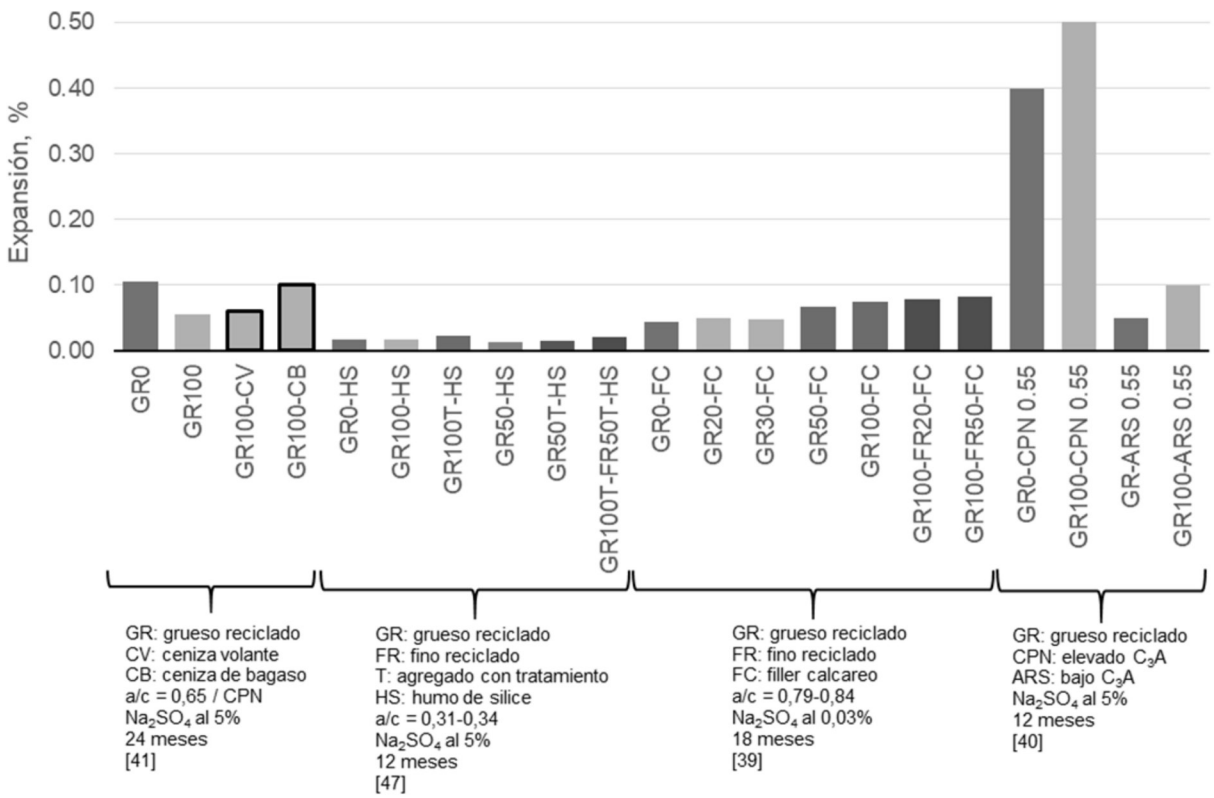


Figura 2. Expansión de HR y HN sumergidos en soluciones de sulfato de sodio [39–41,47].

el ataque químico [50–52]. Zega et al. [53] han presentado un seguimiento de probetas de distintos hormigones reciclados, semi-enterradas en un suelo con elevada concentración de sulfatos (1% p/p) durante un periodo de 10 años. Elaboraron dos series de HR, la "Serie 1" diseñada con criterio de durabilidad (baja relación a/c y aire incorporado) y la "Serie 2" diseñada sin criterio de durabilidad (alta relación a/c). Para ambos casos realizaron reemplazos desde 0 a 100% del AN por AGR. Tras 10 años de seguimiento, para la "Serie 1" no se observó ningún tipo de daño, aún para un 100% de AGR. Por otro lado, en la "Serie 2" no se observó una caída en el desempeño de los hormigones con 25% de reemplazo, respecto al hormigón de referencia, mientras que se encontró una caída muy leve del desempeño en hormigones con reemplazos mayores. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que el uso de AGR no tiene mayores perjuicios en la resistencia del hormigón al ataque por sulfatos.

- Reacción álcali-sílice

La reacción álcali-sílice (RAS) se produce en el hormigón por la presencia de agregados con potencial reactividad (sílice reactiva), álcalis (generalmente aportados por el cemento) y humedad. Como resultado de la interacción entre estos componentes, se forma un gel con capacidad de absorber agua y expandirse generando tensiones internas y deterioro en el hormigón [54]. Al utilizar AR podríamos estar aportando al nuevo hormigón dos de los componentes necesarios para la ocurrencia de la reacción, por un lado sílice reactiva, presente en algunos de los agregados constituyentes del hormigón de origen, y por otro lado álcalis, proveniente de la pasta de cemento endurecida. En el caso que el hormigón de origen haya experimentado daño debido a la RAS, resultaría necesario conocer si la reacción se detuvo o no, y en el caso de que sí, si la reacción se detuvo por falta de disponibilidad de álcalis libres en el sistema o por el consumo de toda la sílice reactiva. También se puede dar la situación en la cual, aún con presencia de álcalis y sílice reactiva, no se haya producido la reacción en el hormigón de desecho debido a la inexistencia de humedad. Ante esta situación, al generar el AR y emplearlo en un hormigón que estará en contacto con humedad se pueden dar las condiciones ideales para que se genere la RAS, considerando además los álcalis que se aporten en la nueva matriz.

En cuanto al aporte de álcalis, Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez [55] han calculado que el máximo aporte de álcalis que puede realizar un AGR es de aproximadamente 2,8 kg/m^3, lo cual es ligeramente mayor al límite considerado como seguro para evitar la RAS. Esto significa que la reacción podría darse en un HR aun usando un cemento de bajo álcalis. Distinto es el problema si el AR aporta sílice sin reaccionar. Esto podría darse en el caso de un hormigón dañado por RAS en el que el proceso se haya detenido por un consumo de todos los álcalis disponibles, o en el caso de que el hormigón de origen tenga agregado reactivo pero un cemento de bajo álcalis. Este aporte puede estar dado por el agregado grueso natural del hormigón original o por el mortero adherido (más específicamente por sílice reactiva en el agregado fino del hormigón de origen), tal como ha sido evaluado por Etxeberría et al. [56]. También puede darse el caso que en el proceso de trituración del hormigón original queden expuestas nuevas caras del agregado natural con potencial reactividad que no se encontraban expuestas anteriormente [57]. No existen muchos resultados en la bibliografía, ni una tendencia definida en cuanto a los efectos de un AR potencialmente reactivo sobre el desarrollo de la RAS en el hormigón reciclado.

Existen algunos estudios que evalúan la efectividad de los métodos tradicionales de evaluación de agregados frente a la RAS para el caso de los AGR [58,59]. Estos señalan algunas consideraciones especiales a la hora de evaluar los AGR, por sus distintas propiedades: por ejemplo, el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674 [60], ASTM C1260 [61]), tritura todo el agregado grueso generando un agregado fino para la elaboración del mortero. En el caso del AGR, las sucesivas

trituraciones generan una gran cantidad de material "fino" a partir del mortero adherido, por lo que el agregado fino resultante no sería representativo de las propiedades del agregado grueso original. Por eso algunos autores recomiendan analizar por separado el agregado natural presente en el AR del mortero adherido en él [58]. Finalmente, en cuanto a las reglamentaciones vigentes, existen algunas que limitan el uso de AR proveniente de hormigones afectado por la RAS, como el EHE 2008 [62], mientras que otras consideran que el AR debe ser evaluado como cualquier otro agregado natural [63,64].

- Congelamiento y deshielo

La durabilidad vinculada a los ciclos de congelamiento y deshielo se encuentra fuertemente vinculada con la estructura de poros del hormigón, dado que es en el interior de ellos que se genera la cristalización del agua y las presiones internas que producen el daño. La práctica más eficiente para anular el ataque por congelamiento es el uso de aditivos incorporadores de aire. El diseño de una matriz cerrada (baja relación agua-cemento y uso de MCSs) contribuye a limitar el ingreso de agua por capilaridad, moderando el ataque.

El tema de congelamiento y deshielo es uno de los problemas de durabilidad con mayor cantidad de bibliografía existente en el campo del HR, pero paradójicamente, es un tema en el que pueden encontrar conclusiones muy diferentes entre sí. Muchos autores han señalado un buen desempeño de hormigones con AGR [10,65–69], e inclusive han reportado una mejor resistencia al ataque por congelamiento que sus respectivos hormigones convencionales de referencia. Por otro lado, varios autores han señalado que el uso de AR tiene un impacto negativo en la resistencia al congelamiento y deshielo del HR [70–72].

Es posible que los diferentes resultados sean debidos a los diversos factores que inciden en la performance de cualquier hormigón en la resistencia al congelamiento. La participación del AR, sus propiedades y la influencia del mortero adherido no han sido del todo comprendidas aún, y por ende no existe un consenso en cuanto a su desempeño. Gokce et al. [71] elaboró primero ARs a partir de hormigones de laboratorio, con y sin aire incorporado, para luego a partir de estos elaborar HR con aire incorporado, y distintas relaciones a/c. En los hormigones con AR con aire incorporado observó un efecto nulo e incluso positivo, mientras que en los hormigones con AR sin aire incorporado encontró un efecto negativo, aún para bajas cantidades de reemplazo y baja relación a/c. Estudios microscópicos confirmaron que el mortero adherido en los AR tuvo un rol protagonista en la formación y propagación de fisuras por el ataque del congelamiento. La utilización en escalas industriales de AR, donde la calidad de los hormigones de origen es variada y muchas veces desconocida, hace prácticamente imposible la utilización de solo AR con aire o sin aire incorporado, por lo cual es conveniente estudiar el peor de los casos. Zega et al. [69], evaluaron HRs con 0, 50, 75 y 100% de AGR (sin aire incorporado), con una matriz diseñada para resistir el ataque por congelamiento y deshielo (relación a/c = 0,35; aire intencionalmente incorporado), según el procedimiento indicado en la norma ASTM C 666 [73]. Luego de los 300 ciclos de congelamiento y deshielo, observaron un desempeño satisfactorio en todas las mezclas evaluadas, aún en aquellas con 100% de AGR. En la Figura 3 se presentan los factores de durabilidad informados en la literatura para hormigones con distintos contenidos de AGR, obtenidos luego de realizarle los 300 ciclos de congelamiento y deshielo.

Algunos autores señalan posibles métodos para mejorar la resistencia al ataque por congelamiento y deshielo, como la utilización de adiciones puzolánicas o una baja relación a/c, que garanticen una baja permeabilidad del hormigón, la utilización de fibras sintéticas, o el mejoramiento del AR mediante la reducción del contenido de mortero adherido o la reducción del tamaño máximo de partícula. Sin embargo, todos estos métodos

tienen efectos menores frente a la utilización de aditivos incorporadores de aire, la cual es una práctica que debe realizarse sin excepciones a la hora de elaborar hormigones expuestos a dichas condiciones.

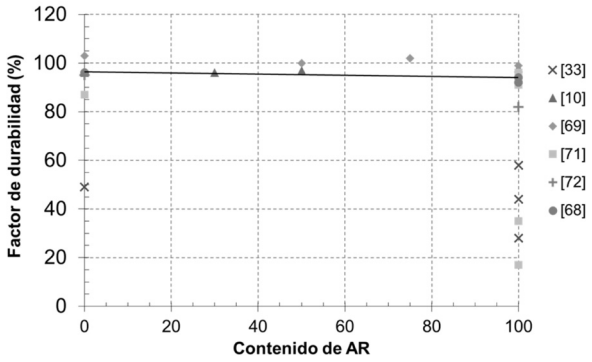


Figura 3. Factor de durabilidad del hormigón vs contenido de AGR

- Exposición a altas temperaturas

La exposición a altas temperaturas puede modificar las propiedades físicas y químicas del hormigón, produciendo cambios volumétricos y fisuración que resultan en una caída de sus propiedades mecánicas. El desempeño de hormigones convencionales expuestos a altas temperaturas ha sido ampliamente estudiado [74–78]. Las principales propiedades del hormigón que influyen en su resistencia a las altas temperaturas son la porosidad de la pasta y la mineralogía de los agregados [79,80]. Además, las condiciones de exposición, como temperatura máxima, tiempo de exposición y tasa de enfriamiento, ejercen un rol principal en la mecánica del daño de los hormigones expuestos, lo que condiciona los métodos de evaluación en laboratorio [81,82]. La diferente microestructura de los HRs conduce a pensar un diferente desempeño frente a este tipo de exposición. El contenido de mortero adherido en las partículas del AR puede hacer que el coeficiente de expansión térmica del mismo no difiera tanto del de la matriz del HR, como sí sucede en un hormigón convencional. Esto resultaría en una deformación más solidaria entre la matriz y el agregado, y en una menor generación de tensiones y fisuración en la zona de interfase.

Zega y Di Maio [83] evaluaron hormigones de diferentes relaciones a/c elaborados con agregado granítico, natural y reciclado (en un 75%), expuestos a 500°C durante 1 y 4 horas, y enfriados lentamente. Tras evaluar el desempeño mediante cambios en los módulos de elasticidad dinámico y estático, velocidad del pulso ultrasónico y resistencia a comprensión, llegaron a la conclusión de que los hormigones con AR tuvieron un similar o mejor desempeño que los hormigones con AN. Este mejor desempeño fue más evidente en tiempos cortos de exposición (1 hora) que en tiempo prolongados (4 horas). La Figura 4 muestra las disminuciones en la resistencia a compresión de los distintos hormigones como consecuencia de la exposición a alta temperatura durante los diferentes periodos de tiempo. En otro trabajo de los mismos autores [84], evaluaron HR producidos con AGR conteniendo distintos tipos de agregados naturales (granítico, cuarcítico y silíceo). Tras ser expuestos a 500°C por el lapso de 1 hora, se observaron otra vez mejores desempeños en los HRs, sobre todo para bajas relaciones a/c. Asimismo, los autores no encontraron diferencias significativas entre los distintos HR debido al uso de diferentes agregados naturales. Esto puede ser explicado por la mayor cantidad de mortero que aporta el AR, que por un lado mejora la compatibilidad entre la expansión térmica del agregado y la matriz, mientras que por otro lado "diluye" la cantidad total de agregado natural en el HR.

De estos estudios surge como principal conclusión que el HR tiene igual o mejor desempeño que los hormigones convencionales luego de su exposición a alta temperatura. Otros estudios en la literatura coinciden con esta hipótesis [85–88]. En términos generales, se puede decir que hormigones con contenidos de AR entre 20 y 100%, expuestos a temperaturas entre 200 y 800°C, y por periodos de tiempo de 1 y 4 horas, han tenido iguales o mejores desempeños que sus respectivos hormigones de referencia. Por su parte, Gupta et al. [89] ha

reportado que en todos los casos los HRs tuvieron peor desempeño que su respectivo hormigón de referencia, incluso habiendo pre-tratado el AR.

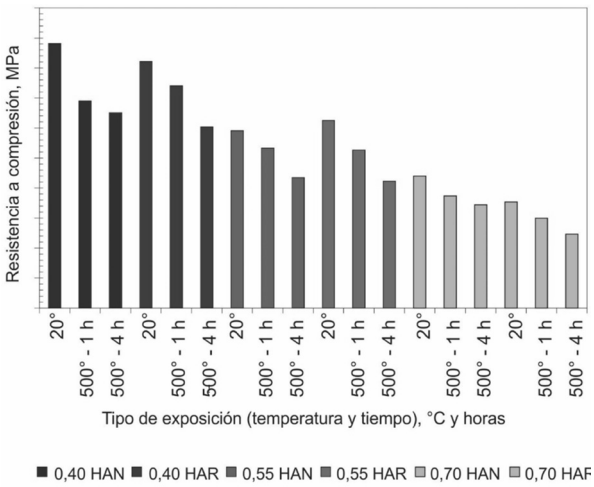


Figura 4. HAN/HAR con diferentes relaciones a/c expuestos a altas temperaturas [83].

COMENTARIOS FINALES

En este artículo se presentó una revisión del efecto del agregado reciclado (AR) en la durabilidad de del hormigón reciclado (HR). Fueron considerados los fenómenos de penetración de cloruros, ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice, congelamiento y deshielo y exposición a altas temperaturas. A pesar de la mayor porosidad de los HRs, en ningún caso se observó un resultado contundente que caracterice como inconveniente el uso del AR.

El efecto negativo del aumento de la porosidad es compensado en forma parcial por otras propiedades del AR que impactan en forma positiva, según el mecanismo involucrado, en la durabilidad del nuevo hormigón. Ya sea por un aumento en la capacidad de fijación de iones agresivos, por una reducción de la restricción interna o una mejor compatibilidad térmica, el uso de AR no significa necesariamente una caída en las propiedades durables del HR. Valores de reemplazo de AN por AR de hasta 25% son los usualmente encontrados en la literatura como recomendables para alcanzar hormigones de buenas prestaciones durables. Sin embargo, en determinados casos se han cumplido satisfactoriamente exigencias prestacionales de durabilidad en hormigones con reemplazos de hasta un 100%.

Si bien de la mayoría de los estudios analizados surge como conclusión que es posible elaborar hormigones reciclados con satisfactorias condiciones de durabilidad, mayores investigaciones son necesarias a fin de conocer en profundidad la participación del AR, y de sus propiedades, en los diferentes mecanismos vinculados a la durabilidad. Una mayor comprensión de la misma permitirá elaborar HR en forma más eficiente y durables a los ambientes agresivos.

REFERENCIAS

1.- Etxeberría Larrañaga, M. (2004) Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 230p

2.- Hansen, T.C. (1986) Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Seibd - State Tge Art Rep. Dev. 1945-1985 RILEM Tech. Commitee 37-DRC Mater Struct, 19 (111), 201-246.

3.- Nixon, P.J. (1978) Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review. Mater. Constr., 11 (65), 371-378.

4.- Sánchez de Juan, M. (2004) Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 502p.

5.- Rasheeduzzafar, y Khan, A. (1984) Recycled concrete - a source for new aggregate. Cem. Concr. Aggreg., 6 (1), 17-27.

6.- Padmini, A.K., Ramamurthy, K., y Mathews, M.S. (2009) Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Constr. Build. Mater., 23 (2), 829-836.

7.- Sánchez de Juan, M., y Alaejos Gutiérrez, P. (2009) Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Constr. Build. Mater., 23 (2), 872-877.

8.- Hansen, T.C., y Narud, H. (1983) Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concr. Int., 5 (1), 79-83.

9.- Sri Ravindrarajah, R., y Tam, C.T. (1985) Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Mag. Concr. Res., 37 (130), 29-38.

10.- Limbachiya, M.C., Leelawat, T., y Dhir, R.K. (2000) Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. Mater. Struct., 33 (9), 574-580.

11.- Zega, C.J., y Di Maio, A. (2003) Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones. Proc XV Reunión Téc. Semin. Hormigones Espec. AATH, Santa Fé, Argentina.

12.- Topçu, İ.B., y Şengel, S. (2004) Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cem. Concr. Res., 34 (8), 1307-1312.

13.- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., y Barra, M. (2007) Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cem. Concr. Res., 37 (5), 735-742.

14.- Gómez Soberón, J.M.V., Agulló Fité, L.I., y Vázquez Romanich, E. (2002) Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Reciclados de Concreto. Aplicación en Concretos. Tecnol. Constr., XIII-157, 10-22.

15.- Tabsh, S.W., y Abdelfatah, A.S. (2009) Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Constr. Build. Mater., 23 (2), 1163-1167.

16.- Kwan, W.H., Ramli, M., Kam, K.J., y Sulieman, M.Z. (2011) Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Constr. Build. Mater., 26, 565-573.

17.- Di Maio, A., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2002) Hormigones con agregados reciclados. Cienc. Tecnol. Hormig. LEMIT, 9, 5-10.

18.- Di Maio, A., Zega, C.J., y Traversa, L.P. (2005) Estimation of compressive strength of recycled concretes with the ultrasonic method. J. ASTM Int., 2 (5), 8p.

19.- Zega, C.J., y Di Maio, A. (2007) Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón. Bol Téc IMME, 45 (2), 1-11.

20.- Otsuki, N., Miyazato, S., y Yodsudjai, W. (2003) Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. J. Mater. Civ. Eng., 15 (5), 443-451.

21.- Gómez Soberón, J.M.V. (2002) Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study. Cem. Concr. Res., 32, 1301-1311.

22.- Neville, A. (1995) Chloride attack of reinforced concrete: an overview. Mater. Struct., 28 (2), 63-70.

23.- Collepardi, M., Marcialis, A., y Turriziani, R. (1972) Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes. J. Am. Ceram. Soc., 55 (10), 534-535.

24.- Tang, L., y Nilsson, L.O. (1993) Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. Cem. Concr. Res., 23 (2), 247-253.

25.- Gonçalves, A., Esteves, A., y Vieira, M. (2004) Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. Proc Int RILEM Conf Use Recycl. Mater. Build. Struct., 9-11 Noviembre 2004, Barcelona, España. 554-562.

26.- Kou, S.C., Poon, C.S., y Chan, D. (2007) Influence of Fly Ash as Cement Replacement on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. J. Mater. Civ. Eng., 19 (9), 709-717.

27.- Tanaka, K., Yada, K., Maruyama, I., Sato, R., y Kawai, K. (2004) Study on corrosion of reinforcing bar in recycled aggregate concrete. Proc Int RILEM Conf Use Recycl. Mater. Build. Struct., 9-11 Noviembre 2004, Barcelona, España,, 634-650.

28.- Villagrán-Zaccardi, Y.A., Zega, C.J., y Di Maio, Á.A. (2008) Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete. J. Mater. Civ. Eng., 20 (6), 449-455.

29.- ASTM C 1202 (1997) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

30.- Zega, C.J., Villagrán-Zaccardi, Y.A., y Maio, Á.A.D. (2015) Chloride diffusion in recycled concretes made with different types of natural coarse aggregates. Proc Int. Conf. Sustain. Struct. Concr., 392-402.

31.- Ann, K.Y., Moon, H.Y., Kim, Y.B., y Ryou, J. (2008) Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. Waste Manag., 28 (6), 993-999.

32.- Hwang, J.P., Shim, H.B., Lim, S., y Ann, K.Y. (2013) Enhancing the durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials. KSCE J. Civ. Eng., 17 (1), 155-163.

33.- Kou, S.-C., y Poon, C.-S. (2013) Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. Cem. Concr. Compos., 37, 12-19.

34.- Saravanakumar, P., y Dhinakaran, G. (2014) Durability aspects of HVFA-based recycled aggregate concrete. Mag. Concr. Res., 66 (4), 186-195.

35.- Corinaldesi, V., y Moriconi, G. (2009) Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. Constr. Build. Mater., 23 (8), 2869-2876.

36.- Kou, S.C., y Poon, C.S. (2012) Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. Constr. Build. Mater., 35, 69-76.

37.- Irassar, E.F. (2001) Ataque químico al hormigón, en Durabilidad del hormigón estructural, AATH, pp. 97-156.

38.- Xiao, J., Li, L., Tam, V.W.Y., y Li, H. (2014) The state of the art regarding the long-term properties of recycled aggregate concrete. Struct. Concr., 15 (1), 3-12.

39.- Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., Leelawat, T. (1999) Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS-5328 designated mixes. Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build., 134 (3), 257-274.

40.- Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V., y Lukić, I. (2017) Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. Constr. Build. Mater., 152, 614-631.

41.- Somna, R., Jaturapitakkul, C., y Amde, A.M. (2012) Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. Cem. Concr. Compos., 34 (7), 848-854.

42.- Lee, S.T. (2009) Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. Waste Manag., 29 (8), 2385-2391.

43.- Lee, S.T., Swamy, R.N., Kim, S.-S., y Park, Y.-G. (2008) Durability of Mortars Made with Recycled Fine Aggregates Exposed to Sulfate Solutions. J. Mater. Civ. Eng., 20 (1), 63-70.

44.- Santillán, L.R., Zaccardi, Y.A.V., y Zega, C.J. (2018) Assessment of the influence of recycled aggregate on the resistance to External Sulfate Attack by accelerated testing of mortar bars. Proc. 4th Int. Conf. Serv. Life Des. Infrastruct. SLD4, 10p.

45.- Santhanam, M., Cohen, M.D., y Olek, J. (2003a) Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1: Summary of experimental results. Cem. Concr. Res., 32, 915-921.

46.- Whittaker, M., y Black, L. (2015) Current knowledge of external sulfate attack. Adv. Cem. Res., 27 (9), 532-545.

47.- Shayan, A., y Xu, A. (2003) Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. ACI Mater. J., 100 (5), 371-380.

48.-Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S.P., Neri-Flores, M.A., Gómez-Soberón, J.M., Almeraya-Calderón, F., Castorena-González, J.H., y Almaral-Sáncez, J.L. (2011) Sulfate attack and reinforcement corrosion in concrete with recycled concrete aggregates and supplementary cementing materials. Int. J. Electrochem. Sci., 6, 613-621.

49.- Zhao, Z., Wang, S., Lu, L., y Gong, C. (2013) Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. Constr. Build. Mater., 43, 191-196.

50.- Neville, A. (2004) The confused world of sulfate attack on concrete. Cem. Concr. Res., 34 (8), 1275-1296.

51.- Haynes, H., O'Neill, R., y Mehta, P.K. (1996) Concrete deterioration from physical attack by salts. Concr. Int., 16 (1), 63-68.

52.- Irassar, E.F., Di Maio, A.A., y Batik, O.R. (2010) Deterioro del hormigón por cristalización de sales. VI Congr. Int. Sobre Patol. Recuperación Estruct., Córdoba,Argentina, 17p.

53.- Zega, C.J., Coelho Dos Santos, G.S., Villagrán-Zaccardi, Y.A., y Di Maio, A.A. (2016) Performance of recycled concretes exposed to sulphate soil for 10 years. Constr. Build. Mater., 102, 714-721.

54.- Midness, S. y Young, J.F. (1981) Concrete. Prentice-Hall, Inc., 671p.

55.- Sánchez de Juan, M., y Alaejos Gutiérrez, P. (2004) Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. Proc Int RILEM Conf Use Recycl. Mater. Build. Struct, 9-11 Noviembre 2004, Barcelona, España, 545-553.

56.- Etxeberria, M., y Vázquez, E. (2010) Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado. Mater. Constr., 60 (297), 47-58.

57.- Shehata, M.H., Christidis, C., Mikhaiel, W., Rogers, C., y Lachemi, M. (2010) Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali–silica reaction. Cem. Concr. Res., 40 (4), 575-582.

58.- Johnson, R., y Shehata, M.H. (2016) The efficacy of accelerated test methods to evaluate Alkali Silica Reactivity of Recycled Concrete Aggregates. Constr. Build. Mater., 112, 518-528.

59.- Barreto Santos, M., de Brito, J., y Santos Silva, A. (2009) Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados Evaluation methods of alkali-silica reaction in concrete with recycled aggre-gates. Rev. Ing. Constr., 24 (2), 141-152.

60.- IRAM 1674 (1997) Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.

61.-ASTM C 1260 (2001) Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).

62.- EHE-08 (2008) Instrucción de Hormigón Estructural. Anejo 15, Recomendaciones para la utilización de horomigones reciclados.

63.- BS EN 12620 (2002) Aggregates for concrete. European Committee for Standardization.

64.- DIN 4226-100 (2002) Aggregates for mortar and concrete, Part 100: recycled aggregates. Deutsche Norm, pp. 18.

65.- Konno, K., Sato, Y., Katsura, O., y Kumagai, M. (2002) Influence of absorption of coarse aggregate on frost resistance and strength of recycled concrete. Proc. 1st FIB-Confress Concr. Struct. 21st Century, 139-144.

66.- Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B., y Foo, S. (2009) Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. Cem. Concr. Compos., 31 (8), 555-563.

67.- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., y Degeimbre, R. (2010) Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cem. Concr. Compos., 32 (6), 421-426.

68.- Richardson, A., Coventry, K., y Bacon, J. (2011) Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. J. Clean. Prod., 19 (2-3), 272-277.

69.- Zega, C.J., Taus, V.L., Villagrán Zaccardi, Y.A., y Di Maio, A. (2005) Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos. Proc. Simp. Fib El Hormig. Estructural El Transcurso Tiempo, La Plata, Argentina, 761-768.

70.- Dai, W., Sun, W.M., y Miu, H.L. Experimental study on freeze-thaw durability of recycled concrete. Concrete, 8, 69-71.

71.- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., y Hisada, M. (2004) Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. Cem. Concr. Res., 34 (5), 799-806.

72.- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., y Wirquin, E. (2004) Frost resistance of recycled aggregate concrete. Cem. Concr. Res., 34 (10), 1927-1932.

73.- ASTM C 666 (2003) Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.

74.- Malhotra, H.L. (1956) The effect of temperature on the compressive strength of concrete. Mag. Concr. Res., 8 (23), 85-94.

75.- Zoldners, N.G. (1971) Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures. ACI, SP-25, 1-32.

76.- Bazant, Z.P., y Kaplan, M.F. (1996) Concrete at high temperatures. Material properties and mathematical models. Burnt Mill Harlow Essex Engl. Logman House.

77.- FIB (2002) Fire. Management, maintenance and strengthening of concrete structures. Bulletin 17, Appendix 6, pp. 133-152.

78.- Denoël, J.F. (2007) Fire safety and concrete structures, 90p.

79.- Barragán, B., Di Maio, A., Giaccio, G., Traversa, L.P., y Zerbino, R. (1999) Hormigones elaborados con distintos tipos de agregado expuestos a altas temperaturas. Cienc. Tecnol. Hormig. LEMIT, 7, 27-41.

80.- Netinger, I., Kesegic, I., y Guljas, I. (2011) The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. Fire Saf. J., 46, 27-41.

81.- Khoury, G.A. (2000) Effect of fire on concrete and concrete structures. Prog. Struct. Eng. Mater., 2 (4), 429-447.

82.- Husem, M. (2006) The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. Fire Saf. J., 41 (2), 155-163.

83.- Zega, C.J., y Di Maio, A.A. (2006) Recycled concrete exposed to high temperatures. Mag. Concr. Res., 58 (10), 675-682.

84.- Zega, C.J., y Di Maio, A. (2009) Recyceld concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. Constr. Build. Mater., 23 (5), 2047-2052.

85.- Xiao, J.Z., y Zhang, C.Z. (2007) Fire Damage and Residual Strengths of Recycled Aggregate Concrete. Key Eng. Mater., 348-349, 937-940.

86.- Vieira, J.P.B., Correia, J.R., y de Brito, J. (2011) Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. Cem. Concr. Res., 41, 533-541.

87.- Kou, S.C., Poon, C.S., y Etxeberria, M. (2014) Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled concrete coarse aggregates. Cem. Concr. Compos., 53, 73-82.

88.- Adebakin, I.H., y Ipaye, T.O. (2016) Effect of elevated temperature on the compressive strength of recycled aggregate concrete. Res J Eng Sci, 5 (9), 1-4.

89.- Gupta, A., Ghosh, S., y Mandal, S. (2012) Coated recycled aggregate concrete exposed to elevated temperature. Glob. J. Res. Eng. Civ. Struct. Eng., 12 (3), 7.

MORTEROS CEMENTICIOS CON RESIDUOS PLÁSTICOS DE PET Y RAEE

CEMENT MORTARS MADE WITH PLASTIC WASTES FROM PET AND WEEE

L. Peisino[1], J. Kreiker[1], R. Gaggino*[1], J. Gonzalez Laria[1], M. Gómez[1], B. B.Raggiotti[2], M.Positieri[2], P. Uberman[3]*

[1] Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE – CONICET. Asociación Vivienda Económica – AVE. jkreiker@ceve.org.ar
2 Centro de Investigaciones en Tecnología de Materiales y Calidad – CINTEMAC – UTN-FRC
[3] Instituto de Investigaciones en Físico-química Córdoba – INFIQC - CONICET

RESUMEN

En la industria de la construcción se utilizan sistemas o componentes constructivos elaborados con materiales no renovables (por ejemplo: arena, piedra, metales, cemento) o de difícil renovación (por ejemplo: suelo y madera). Esta industria continua en crecimiento y a pesar de los esfuerzos por frenar el consumo desmedido de material virgen, sigue consumiendo los recursos naturales del planeta.

Con la premisa de reducir el consumo de recursos naturales no renovables y disminuir la contaminación ambiental que generan los residuos, en el Centro Experimental de la Vivienda Económica -CEVE- se han desarrollado diferentes investigaciones que proponen el reciclado de residuos urbanos e industriales para la elaboración de componentes constructivos ecológicos destinados a la construcción de viviendas sociales y construcciones civiles en general.

Dentro de las temáticas abordadas, se encuentran dos proyectos que incorporan residuos plásticos a matrices cementicias para fabricar materiales de construcción y componentes constructivos. Una de estas líneas plantea el uso de residuos de Polietilen-tereftalato (PET) proveniente de envases de bebidas mezclados con arena y cemento para fabricar ladrillos y bloques; en otro proyecto se estudia el uso de la fracción plástica de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) recubiertos de una mezcla de cemento y aditivos estabilizantes mediante la técnica del core-shell para fabricar un árido sintético.

La importancia de la implementación de estas tecnologías radica en las ventajas económicas, ambientales y sociales que tienen estos desarrollos, ya que permiten revalorizar desechos y disminuir el uso de materiales vírgenes, fabricando productos técnicamente aptos y generando puestos de trabajo.

Palabras clave: *Elementos Constructivos, Plásticos Reciclados, RAEE, PET*

ABSTRACT

In the construction industry there are used systems or building components made with not renewable raw materials (for example: sand, stones, metals, cement) or with difficult renewal like wood and soil. This industry is growing and despite the efforts to diminish the wasteful consumption of virgin material, continues to consume the natural resources of the planet. With the premise of reducing the consumption of non-renewable natural resources and reduce the environmental pollution that the wastes generate, in the Experimental Center of Economical Housing -CEVE- we have developed different researches which propose the recycling of urban and industrial wastes, for the production of ecological components intended for the construction of social housing and civil constructions in general. Within the topics developed, are two projects that incorporate waste plastics to cement matrix to make construction materials and building components. One of these projects raises the use of residues of Polietilen-terephthalate (PET) from drink bottles discarded mixed with sand and cement to make bricks and blocks. Other research work studied the use of the plastic fraction of Wastes from Electric and Electronic Equipment (WEEE) covered whit a mixture of cement and stabilizing additives through the core-shell technique to manufacture and synthetic aggregate (AS). The importance of these technologies is based on the economic, environmental and social advantages, because they allow to revalue wastes and reduce the use of virgin materials, manufacturing products technically suitable and generating jobs.

Keywords: *Constructive Elements, Recycled Plastics, WEEE, PET*

PRIMERA PARTE: LADRILLOS DE PET

Introducción

En nuestro equipo de trabajo se desarrolló la tecnología para fabricar ladrillos de PET (polietileno tereftalato) proveniente de envases desechados, los cuales mediante un proceso productivo simple se trituran y moldean en matriz cementicia para fabricar ladrillos de dimensiones similares a los ladrillos tradicionales. Los ladrillos de PET tienen menor peso y mayor aislación térmica que los tradicionales y en general poseen muy buenas propiedades técnicas. Las principales propiedades técnicas de los ladrillos se resumen en la siguiente tabla y ya fueron publicadas en trabajos previos [1].

Esta tecnología se ha transferido a varios municipios, gobiernos provinciales y emprendimientos productivos en diversos puntos de la Argentina, en proyectos participativos y multidisciplinarios, que tienen como objetivos mitigar el daño ambiental y crear conciencia sobre la recolección de los residuos [2, 3]. Sin embargo, es necesario mejorar las propiedades técnicas del componente constructivo para ampliar el alcance de su uso. La resistencia a la compresión simple de los ladrillos de PET es de 2 MPa y la norma de aplicación para este tipo de construcciones CIRSOC 501 (2007), especifica una resistencia de 5 MPa para los ladrillos en función portante, con lo cual el uso de los ladrillos de PET se limita a cerramientos.

Existen innumerables estudios sobre el agregado de residuos plásticos a morteros y materiales compuestos de matriz cementicia. De esta manera, residuos de PET y otros plásticos, han sido usados tanto como agregados o fibras en morteros [4]. Estos estudios demuestran que la composición química, la dosificación, la granulometría de las partículas del desecho juegan un papel importante en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales [5].

.

Para los morteros con agregados plásticos, el tamaño de las partículas influye de manera significativa en

Propiedad	Valor
Peso específico	1150 kg/m^3
Absorción de agua	masa 19,1 %, volumen 214 kg/m^3
Resistencia característica a la compresión	2,00 MPa.
Resistencia acústica en un muro de 0,15 m de espesor revocado de ambos lados	41 dB
Resistencia al envejecimiento	Son resistentes a la acción de rayos ultravioleta y humedad
Permeabilidad al vapor de agua	Entre 1,76 y 3,81 x 10 -2 ± 4% g/mhkPa
Resistencia al fuego	Clase RE 2 Material combustible de muy baja propagación de llama
Conductividad térmica	coeficiente: 0,15 w/ mK.
Adherencia de revoques	0,25 mPa
Resistencia al corte y aserramiento	Son fáciles de cortar y aserrar

la resistencia a la compresión. Además, es posible inferir que la forma de las partículas de PET actúa en detrimento de la resistencia, ya que son planas y no poseen rugosidad en la superficie, factores que actúan en detrimento de la resistencia del concreto [6-8]. Este trabajo expone los resultados de la investigación tendiente a mejorar las propiedades morfológicas del agregado, mediante la adición de material inorgánico de particulado fino para rellenar los sitios intersticiales, como factor de incremento de la resistencia a la compresión.

Materiales y métodos

Se utilizó Cemento Portland CPC40 (IRAM 50000) provisto por Holcim. El material de control fue mortero preparado con Cemento Portland y agregado de PET. El PET utilizado proviene de botellas de bebidas descartadas, trituradas a tamaño promedio de 3 mm. El material inorgánico agregado fue residuo de pulido de porcelanato (RPP) provisto por empresas privadas del sector, secado a 80 °C durante 24 horas. La arena fue de ríos de la región de Córdoba. Como aditivo se utilizó pintura látex de calidad comercial. El agua utilizada fue de red.

El análisis granulométrico de los agregados y determinación del módulo de finura MF, según norma IRAM1505-1627 de ensayo para áridos finos. Se evaluó la resistencia a la compresión simple, según norma IRAM 1622 de cementos utilizando probetas prismáticas de 4x4x16 cm. Luego en ladrillos de 12x5x26, según tecnología desarrollada en la investigación original. Los ensayos se realizaron los 28 días de fragüe y los valores informados corresponden al promedio de 6 probetas por ensayo.

Serie 1: Probetas prismáticas de 4x4x16 cm, Fig. 1. En una primera serie se utilizan distintos agregados finos en la mezcla de mortero, para un ensayo comparativo entre RPP y Arena. La dosificación de las probetas se informa en la sección de resultados 3.2, Tabla 1.

Serie 2: Probetas prismáticas de 4x4x16 cm con la relación 1:6 de cemento: PET y proporciones variables de RPP de 10%, 20% y 30% en peso. Se adicionó como aditivo para mejorar la resistencia pintura látex disuelta en el agua de amasado a dos niveles: 5% y 10% v/v, Tabla 2.

Serie 3: Probetas prismáticas de 4x4x16 cm. Mezcla de PET con cemento en proporción 1:6 en volumen y RPP al 30% en peso como agregado

fino. Para determinación de la relación de agua/cemento y la evolución de la resistencia en tiempos posteriores al fragüe del cemento, según se detalla en resultados. Tabla 3.

Serie 4: Ladrillos de 26x12x6 con la mezcla de PET con cemento portland en proporción 1:6 en volumen y agregado de RPP en porcentaje 30% en peso. Los ladrillos fueron fabricados por compactación y ensayados a la compresión a los 28 días. Figura 1.

Figura 1. Ladrillos producidos con la fórmula original (izquierda) y con el agregado de árido fino RPP (derecha)

Resultados y discusión

Las curvas de análisis granulométrico para el PET triturado y los áridos finos se muestran en la Figura 2. En todos los casos se analizó una muestra de 500 g del material. El RPP no pudo ser analizado por el mismo método, debido a que más del 99% del material pasó el tamiz 200 (granulometría < 74 μm).

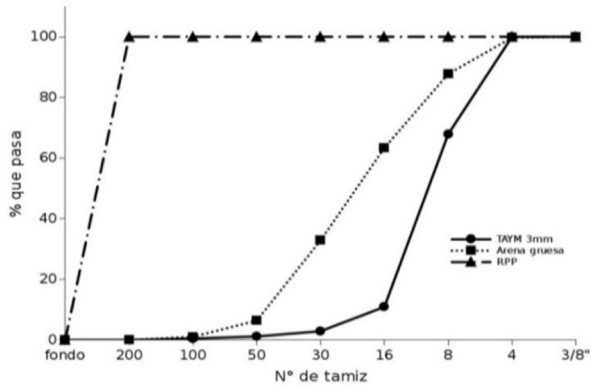


Figura 2. Ensayos de granulometría, PET, Arena de rio y RPP

La curva granulométrica del PET triturado arrojó un módulo de finura (MF) de 4,16 correspondiente a un particulado grueso. Se puede observar que en gran porcentaje el agregado PET triturado corresponde a granulometrías entre el tamiz Nº 8 y 4, de 2,38 a 4,76 mm, con una caída muy abrupta al 10% para el tamiz N°16 de 1,19 mm, lo que pone de manifiesto la escasa presencia de partículas finas que completen los sitios intersticiales. La arena en cambio posee más de un 60% de su masa por debajo del tamiz Nº 16 y con un mayor rango de tamaño lo que explica su compacidad [9], con un módulo de finura de 3,09 correspondiente a un agregado más fino. Es por esto que podemos suponer que el agregado RPP de granulometría fina actuaría complementariamente, aumentando de manera más marcada la compacidad de las mezclas con PET triturado que las de arena.

Resistencia a compresión

Los resultados de resistencia a la compresión de la Serie 1, con distintos agregados finos en la mezcla de mortero, entre RPP, arena de rio y la formulación testigo de cemento y PET se muestran en la Tabla 1. Las probetas con arena y RPP tuvieron un buen incremento respecto del Patrón, correspondiendo al 100% para el agregado más fino RPP. Esto da cuenta del aumento de resistencia producido por la complementación granulométrica del agregado fino RPP y arena al PET, lo que permite llenar los sitios intersticiales e incrementar la resistencia a la compresión. De la misma forma se destaca el aumento de densidad alrededor de un 20%, hasta 0,93 g/cm^3. La Figura 3, muestra el interior de las probetas, luego del ensayo de rotura.

En la Serie 2 se utilizó la mezcla para ladrillos con PET triturado en proporción de cemento 1:6, 1:4,5 y 1:3 con diferentes cantidades de RPP y con aditivo látex.

En las probetas de relación cemento/áridos 1:6 v/v, con 10% de RPP se puede observar que al agregar el aditivo látex incrementa la resistencia un 10% al primer nivel de látex y un 30% al segundo

Tabla 1: Ensayo probetas Serie 1

Probetas	Densidad (g/cm^3)	PET (g)	Agregado fino		Cemento		Resistencia a la compresión		
			Tipo	Cantidad (g)	Relación v/v	Cantidad (g)	Valor (MPa)	CV%	% RDP
S1FP	0,81	500	-	-	1:6	200	1,8	13,4	100
S1F1	0,84	500	AG	150	1:6	200	3,1	23,6	172
S1F2	0,93	500	RPP	150	1:6	200	3,6	6,0	200

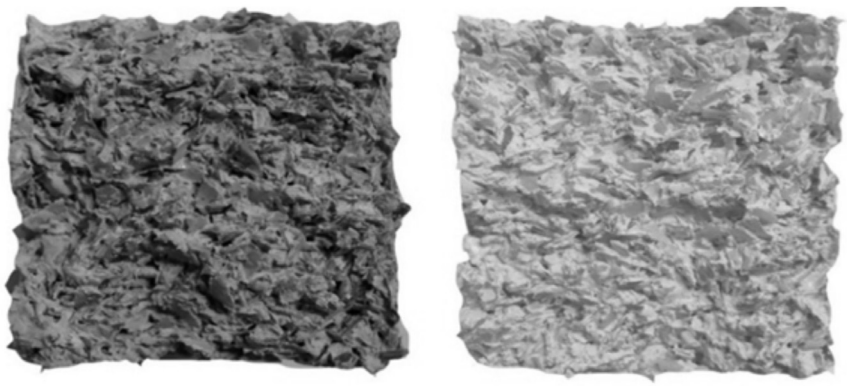


Figura 3. Probetas ensayadas S1FP (izquierda) S1F2

Tabla 2: Ensayo probetas serie 2

Probetas	PET (g)	Agregado fino		Cemento		Resistencia a la compresión		
		Aditivo Látex	RPP (g)	Relación v/v	Cantidad (g)	Valor (MPa)	CV%	% RDP
S2FP	500	-	-	1:6	200	1,3	7,8	100
S2F1	500	-	50	1:6	200	1,0	17,6	76,9
S2F2	500	20 mL	50	1:6	200	1,1	7,4	84,6
S2F3	500	40 mL	50	1:6	200	1,3	13,0	100,0
S2F4	500	20 mL	100	1:6	200	1,7	18,7	130,8
S2F5	500	40 mL	100	1:6	200	2,2	15,4	169,2
S2F6	500	20 mL	150	1:6	200	2,2	14,8	169,2
S2F7	500	40 mL	150	1:6	200	2,7	10,0	207,7

nivel con respecto al patrón y un 20% entre los dos niveles de aditivo. Este efecto se repite en las siguientes series al comparar las series con dos niveles de agregado de aditivo S2F4 con S2F5 y S2F6 con S2F7, Tabla 2.

Además, es posible observar el efecto de incrementar el agregado de RPP, que resulta en un 50% de resistencia al pasar de 10% a 20% y al 100% al pasar de 10% a 30% para los dos niveles de aditivo látex, Figura 4.

Se ha podido observar que un tratamiento superficial del PET triturado con aditivo látex, le confiere una película superficial que posiblemente sea la responsable del incremento de la resistencia, ya que la interfase PET-cemento de adherencia nula, podría ser modificada por la película de látex (Figura 5) a un sistema PET-Látex-cemento de mayor adherencia entre componentes.

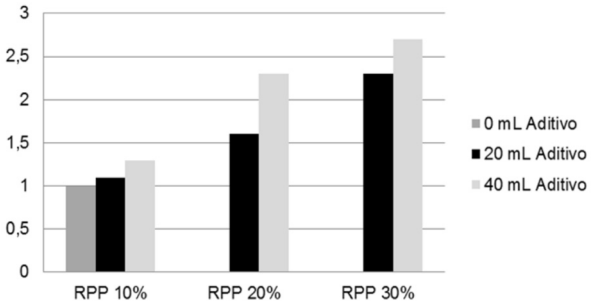


Figura 4. Resistencia a compresión de probetas con agregado de RPP

En la Serie 3 se estudió la relación agua/cemento para el agregado de RPP de 30% y sin agregado de aditivo látex. Se analizó el comportamiento de resistencia a compresión entre 200 a 500 mL de agua de amasado, los resultados se muestran en la Tabla 3.

El agua de amasado óptima fue determinada en 350 mL, relación a/c=1,75 con respecto a cemento puro y a/c=1,0 si se considera al sistema cemento + RPP como ligante. Por debajo de los 200 mL las mezclas no tenían suficiente humedad

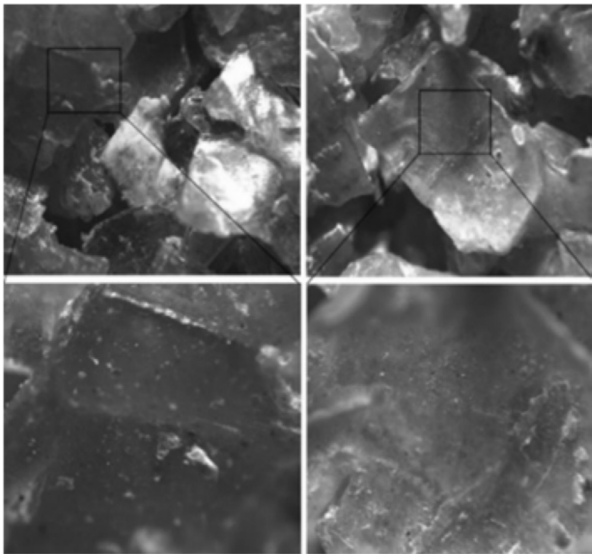


Figura 5. Partículas de PET (izquierda) y PET con pintura látex (derecha), zoom inferior a las partículas.

Tabla 3: Ensayo probetas serie 2

Probetas	Densidad (g/cm^3)	Agua (mL)	Látex (%)	Cemento (g)	A/C	Resistencia (MPa)	CV%	Incremento % RDP
S3AFP	1,09	200	5	200	1	2,2	13,0	
S3AF1	1,14	250	5	200	1,25	2,9	8,0	31,8
S3AF2	1,21	300	5	200	1,5	3,5	8,0	59,1
S3AF3	1,10	350	5	200	1,75	3,6	6,0	63,6
S3AF4	1,04	400	5	200	2	2,8	12,0	27,3
S3AF5	1,14	450	5	200	2,25	2,4	11,0	9,1
S3AF6	1,04	500	5	200	2,5	2,2	7,0	0

y por encima de los 450 mL la compactación era dificultosa por el exceso de agua en la mezcla. Esta elevada demanda de agua por parte de la mezcla de cemento + RPP, se estudió también en una prueba sencilla que consistió en determinar la demanda de agua necesaria para humectar una muestra de RPP y cemento respectivamente. Siendo superior en un 66% la demanda de agua para humectar el RPP, hasta alcanzar una plasticidad apropiada para un mortero, que la del cemento puro.

Producción de ladrillos

Se realizaron las pruebas de producción de ladrillos, utilizando las condiciones reales de trabajo en una máquina de moldeo y compactación manual. Se ensayaron dos series de 6 ladrillos con la formula S2F7, que demostró mejores resultados en las pruebas preliminares y se comparó contra patrón sin agregados ni aditivos. Los resultados muestran una resistencia del 197,70% en comparación con la fórmula original. Si bien los valores no alcanzan para ampliar la función de los ladrillos a portantes, se encuentran muy cercanos al indicado por reglamento de 4MPa, Tabla 4. Continuando en la investigación, esto podría alcanzarse.

Conclusiones Parciales

• Al reemplazar un 30% P/P de PET por RPP, se logró aumentar la resistencia de las probetas hasta un 107%, lo que se explica por la complementariedad de la granulometría de un agregado fino con el PET triturado.

• Los ladrillos producidos con la mezcla S2F7, con un 30% de agregado RPP y pintura látex al 5% en el agua de amasado, en condiciones de trabajo reales, mejoraron su resistencia a la compresión un 98%. Si bien aún no alcanza para la función portante requerido por la norma de aplicación en Argentina, con estos agregados proporciona mayor seguridad para cualquier uso de los ladrillos.

• El aumento de la masa alrededor del 20% de las mezclas, permite inferir un aumento en la conductividad térmica del ladrillo, que deberá ser estudiada.

SEGUNDA PARTE: ÁRIDO SINTÉTICO CON PLÁSTICOS DE RAEE – Proyecto conjunto CEVE-CINTEMAC con colaboración de INFIQC

Introducción

En los últimos quince años ha aumentado el consumo de aparatos eléctricos y electrónicos de manera descomunal, solo en el año 2010 en la Argentina se vendieron un millón de televisores, 12 millones de teléfonos celulares, 1,2 millones de impresoras y cerca de 2,65 millones de computadoras [10].

Tabla 4: Ensayo de ladrillos

Probetas	Agregado PET	Agregado RPP	Aditivo Latex	Resistencia (MPa)	% RDP
S4F1	70%	30%	5%	3,72	186,10
S4F2	70%	30%	5%	3,32	166,03
S4F3	70%	30%	5%	3,95	197,31
S4F4	70%	30%	5%	3,74	187,15
S4F5	70%	30%	5%	3,87	193,52
S4F6	70%	30%	5%	3,75	187,46
S4F7	70%	30%	5%	3,07	153,47
S4F8	70%	30%	5%	3,95	197,70

Debido a la obsolencia de este tipo de bienes de consumo, se generan aproximadamente 120.000 Tn de basura electrónica por año en nuestro país, lo que se puede expresar como 3,5 Kg de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) por persona. Además es imposible estimar la cantidad acumulada, y sólo un 5% es tratado adecuadamente por empresas recicladoras [11].

Este residuo es de difícil tratamiento debido a la presencia de ciertos compuestos dañinos para la salud y el ambiente. En general presentan una concentración importante de metales pesados, sustancias halogenadas y derivados de la descomposición de los plásticos [12]. La fracción metálica es la que posee mayor valor monetario y por consiguiente es comercializada a empresas destinadas a la recuperación de los mismos, de esta manera se recupera una gran cantidad de metales con alto valor agregado como oro, plata, bismuto, cobalto y paladio, entre otros.

Del total de los RAEE el 20% corresponde a la fracción plástica, la cual está compuesta principalmente por el copolímero acrilonitrilo–butadieno–estireno (ABS), poliestireno (PS) y poliestireno de alto impacto (HIPS) [13] . Dicha fracción es la más difícil de insertar en los circuitos de reciclado, uno de los inconvenientes que poseen este tipo de plásticos es la presencia de aditivos retardantes de llama del tipo aromáticos polibromados, los cuales son nocivos para la salud y el ambiente, por lo que su inadecuada gestión resulta en la contaminación del suelo y las napas subterráneas. Desde el punto vista de las propiedades mecánicas este tipo de plásticos es muy duro y resistente a los golpes por lo que son adecuados para ser empleados como materiales de carga para la elaboración de materiales en el área de la construcción, como pueden ser mampuestos tipo ladrillos o premoldeados.

Por otro lado, es conocido que el cemento portland es un sustrato adecuado para llevar a cabo una estrategia de estabilización–solidificación tanto de contaminantes orgánicos como de contaminantes inorgánicos como los metales pesados [14].

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente es que en nuestro Centro de Investigación desarrollamos una tecnología de fabricación de un árido sintético (AS), mediante el encapsulado de las partículas plásticas de RAEE con sucesivas capas de cemento portland y diversos aditivos. El fin es poder utilizar este residuo para la elaboración de mampuestos y/o premoldeados de manera segura tanto desde el punto de vista técnico–estructural como de la estabilización de los contaminantes presentes en dicho residuo plástico. En este trabajo se presenta la fabricación y caracterización de dos formulaciones diferentes de AS, la elaboración de probetas en matriz cementicia y el estudio de su comportamiento en ensayos de compresión simple.

Caracterización del residuo

El plástico de RAEE, provisto por la firma Ecotech, fue triturado con un molino de cuchillas rotativas equipado con un tamiz de 3 mm. En la Figura 6 se presenta la curva granulométrica de dichas partículas plásticas junto con la curva granulométrica de arena gruesa de río empleada para elaborar las probetas denominadas patrón (Tabla 6, serie 4). Se observa claramente como el plástico de RAEE posee una curva discontinua ya que el 90% del material quedan en los tamices Nº 8 y 16, mientras que la arena posee una distribución de tamaños de partícula más homogénea. Esto es propio de la forma en que se produce el triturado del plástico de RAEE.

Producción del árido sintético

El AS se elaboró a partir de partículas plásticas de RAEE, cuya curva granulométrica se muestra en la Figura 6. Se llevó a cabo la preparación de dos tipos de AS diferentes P1 y P2.

El primero (P1) posee en su composición 500 g de plástico de RAEE y 300 g de cemento, el cual fue adicionado junto con el agua (120 mL) en tres veces generando así sucesivas capas (un total de

tres capas), se esperó 24 horas de fraguado y se tamizó (malla Nº 4, 4,8 mm) entre capa y capa.

El AS P2 posee otro residuo como aditivo, este es el residuo del pulido de los porcelanatos (RPP) el cual es un polvo muy fino compuesto principalmente por SiO_2 (pasa el tamiz Nº 200, tamaño de partícula < 74 µm) [15]. El árido P2 está formado por 500 g plástico de RAEE, 300 g de RPP y 300 g de cemento, el RPP y el cemento se mezclaron previamente en seco y luego se adicionaron junto con el agua (240 mL) en tres veces, generando así sucesivas capas, se esperó 24 horas de fraguado y tamizó (malla Nº4, 4,8 mm) entre capa y capa.

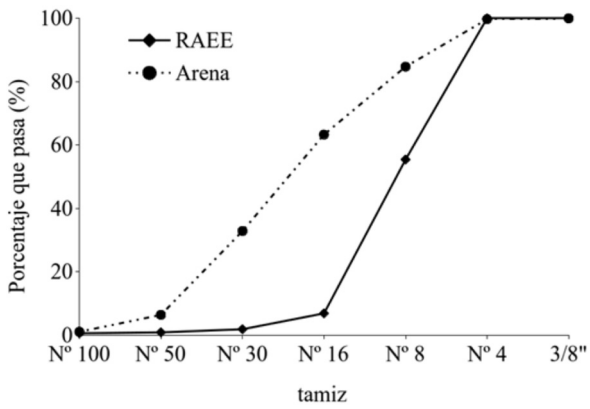


Figura 6. Curva granulométrica de RAEE triturado a 3 mm.

Se determinó la densidad de cada uno de los AS, resultando ser 0,77 y 0,84 g/cm^3 para P1 y P2 respectivamente. Comparando estos valores con la densidad del material de partida (densidad aparente de plástico de RAEE es 0,56 g/cm^3) se puede apreciar que son mayores, lo cual es propio de la mayor proporción de material fino que poseen los AS P1 y P2.

Respecto al tamaño y a la forma de los AS obtenidos se observa a simple vista que los mismos son más grandes que el plástico de RAEE, son más esféricos y los ángulos de las aristas de las partículas son más suaves (Figura 7). Lo mencionado anteriormente se encuentra de acuerdo con los parámetros de tamaño y forma presentados en la Tabla 5, los cuales fueron

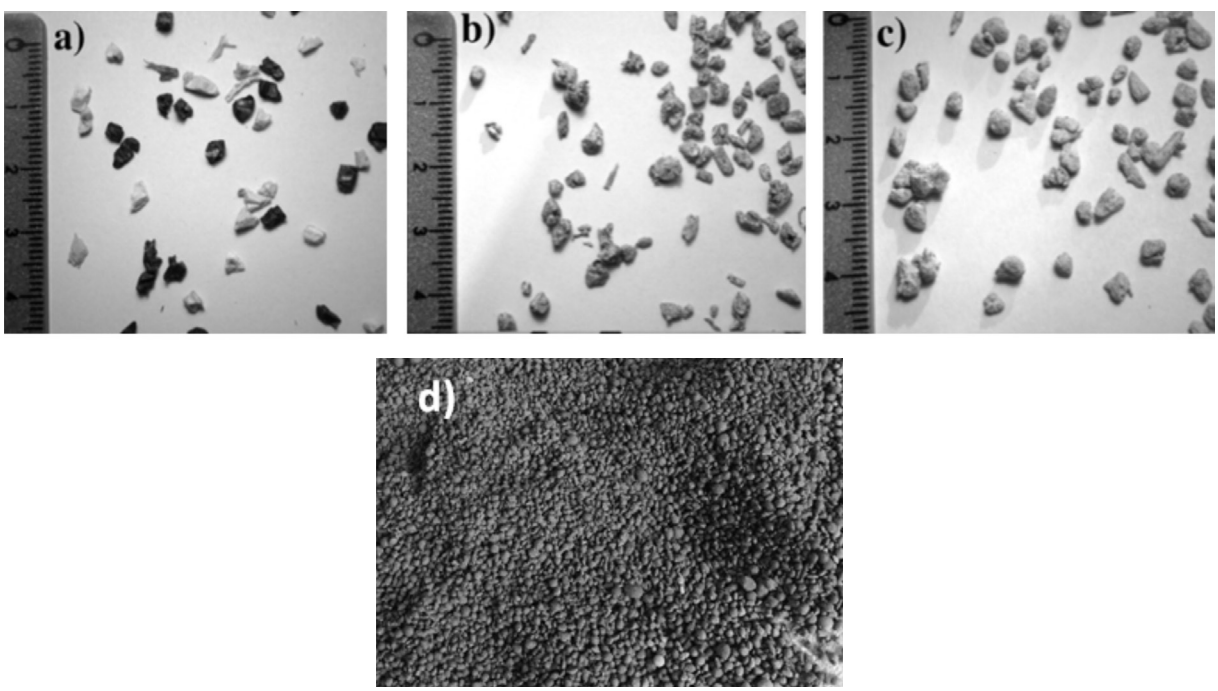


Figura 7. Partículas de RAEE (a) y de los AS P1 (b) y P2 (c) y P3 con carbón.

determinados mediante una metodología de toma y procesado de imágenes. Este cambio en la forma y aumento de tamaño no solo se debe a que P1 y P2 poseen como recubrimiento un material muy fino como el cemento, sino también a que se generan aglomeraciones de partículas las cuales forman agregados de mayor tamaño. La forma de las partículas de AS se describe según los descriptores de la Tabla 5.

Tabla 5: Descriptores de forma.

	RAEE	P1	P2
Área (mm^2)	13	16	23
Circularidad	0,58	0,63	0,64
Redondez	0,67	0,70	0,71

Elaboración de probetas y ensayos de resistencia a la compresión

Se moldearon probetas de 4x4x16 cm normalizadas para ensayo de resistencia a la compresión simple. En una primera serie se utilizó como árido en la mezcla de mortero el plástico de RAEE sin ningún tratamiento (solo molido con un tamiz de 3 mm). Luego se emplearon los áridos sintéticos P1 y P2 como material de carga en el mortero. Además, se realizaron patrones donde el mortero fue preparado con arena gruesa. Como ligante para los morteros se empleó cemento Portland CPF40 marca Holcim. Se estudiaron relaciones de árido:cemento 6:1 y 4:1 en volumen. En todos los casos la relación en masa agua:cemento fue cercana a 0,5 y ajustada a mano para cada mortero. Las diferentes dosificaciones de las probetas se muestran en la Tabla 6.

Una vez elaboradas las correspondientes probetas, fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas durante 28 días en condiciones de saturación de humedad a 25 °C. A los 28 días de fragüe las probetas fueron sometidas a ensayos de resistencia a la compresión simple

Las probetas fueron fraguadas durante 28 días en bateas saturadas de humedad a una temperatura de 25 °C.

Los ensayos a la compresión simple se realizaron con una prensa hidráulica accionada eléctricamente, la cual posee una velocidad de descenso de 0,7 mm/s. El dispositivo de ensayo y el tamaño de las probetas se encuentran de acuerdo a la Norma IRAM 1622, de ensayos de resistencia a la compresión simple para hormigones. Los resultados se presentan en la Tabla 6, los valores informados corresponden al promedio de 6 ensayos diferentes.

Como se observa en la Figura 8, la resistencia a la compresión simple de las probetas de RAEE (Tabla 6, serie 1) no supera los 2 MPa indicados

Tabla 6: Descriptores de forma.

Serie	Árido (g)		Cemento (g)	A:C	ρ (g/cm^3)	Tmáxima (MPa)
1	RAEE	144	50	6:1	1,8	1,8
2	P1	197	50	6:1	4,6	4,6
3	P2	215	50	6:1	5,0	5,0
4	Arena	407	50	6:1	9,7	9,7
5	P1	197	75	4:1	5,3	5,3
6	P2	215	75	4:1	8,2	8,2

Árido:Cemento, relación en volumen.

por el Reglamento CIRSOC–501 para que el mampuesto pueda ser empleado como material de cerramiento. Por otro lado, la resistencia de las probetas elaboradas con el AS P1 (Tabla 6, serie 2) supera ampliamente a las elaboradas con el plástico sin tratamiento previo. El empleo del AS P1 no solo mejora el desempeño de las probetas al ensayo de compresión simple, sino que dicho valor de resistencia se encuentra por encima de lo estipulado por el reglamento para mampuestos que son aceptados para emplearse como material portante. Asimismo las probetas elaboradas con el AS P2 y una relación árido:cemento 6:1 (Tabla 6, serie 3) poseen un a resistencia a la compresión de 5,0 MPa. El AS P2 posee una mayor proporción de material debido a que tiene RPP además de cemento como cobertura, sin embargo, esto no se refleja en un aumento significativo en la resistencia a la compresión respecto a las probetas elaboradas con P1.

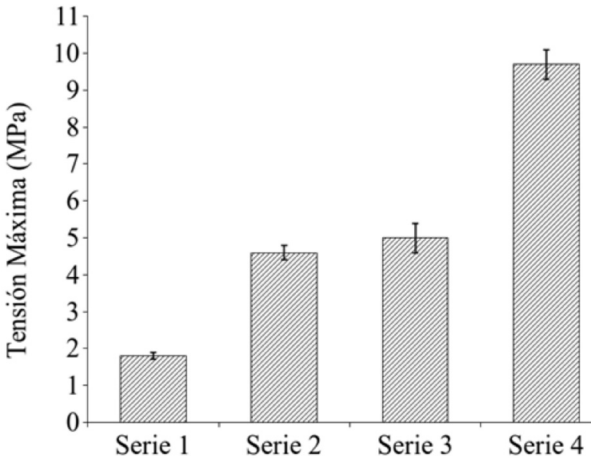


Figura 8. Resistencia a compresión de probetas con una relación árido:cemento 6:1.

Por otra parte, se ha observado un aumento significativo en la resistencia a la compresión de las probetas elaboradas con el AS P2 y una relación árido:cemento 4:1 (Figura 9), casi el doble que para una relación árido:cemento 6:1. Lo llamativo es que la resistencia a la compresión con esta proporción de cemento de las probetas elaboradas con el AS P1 no es significativamente mayor que para una relación árido:cemento 6:1 (Tabla 6, serie 2 y 5). Finalmente es posible realizar una mención acerca de la cantidad de cemento total que posee cada serie de probetas. El porcentaje de cemento total presentado en la Tabla 6 tiene en cuenta el cemento necesario para la elaboración del correspondiente AS y el cemento necesario para elaborar la probeta. Como se puede observar en dicha Tabla las probetas de plástico RAEE (serie 1) son las que menor proporción de cemento presentan, asimismo estas probetas son las que presentan una menor resistencia la compresión. Las probetas de la serie 2 (P1) poseen un 50% de cemento mientras que las de la serie 3 (P2) dicha cantidad es del 41%. Por más que las probetas de la serie 2 tengan una mayor proporción de cemento, poseen la misma resistencia a la compresión que las probetas de la serie 3.

Por otra parte, las probetas de la serie 5 (P1) son las que tienen una mayor proporción de cemento sin embargo la resistencia a la compresión es solo de 5,3 MPa. Mientras que para las probetas de la serie 6 (P2), que poseen un porcentaje de cemento del 46% la resistencia a la compresión es 8,2 MPa. Esta diferencia debe estar relacionada con las distintas formas y distribución de tamaños de las partículas del AS P1 y P2.

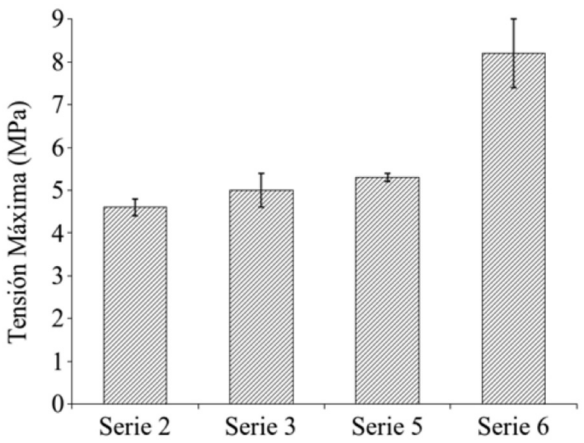


Figura 9. Resistencia a compresión de P1 y P2 con relación árido:cemento 6:1 y 4:1.

Estabilización de contaminantes

Se pudo determinar que en los morteros en los que se incorporó el AS, los metales pesados se estabilizan en la matriz cementicia. La cuantificación se llevó a cabo mediante el tratamiento con digestión ácida con agua regia y luego la determinación de concentración por espectrofotometría de absorción atómica. En la Tabla 7 se muestran los resultados de la cuantificación de los principales metales presentes en morteros preparados con plásticos de RAEE y en AS P1 y P2.

Tabla 7: Descriptores de forma.

Metal	Plástico de AEE	P1	P2
Cu	ND	ND	ND
Pb	51,83	ND	ND
Zn	154,74	ND	ND
Cr	ND	ND	ND
Sb	740,48	ND	ND

ND: No detectado

Los compuestos orgánicos se comportan de manera diferente, tanto en el AS como al agregar directamente plástico de RAEE a mezclas cementicias, con el tiempo aparece una coloración amarillenta que se corresponde con un producto de descomposición de los retardantes de llama BFRs en presencia de la luz UV. En estos casos es posible inferir que, debido a la naturaleza química de los grupos funcionales presentes en los retardantes de llama, en medio básico del agua cementicia se produce la deprotonación de los grupos hidroxilos y por tanto su solubilización en agua, que resulta finalmente en la migración a la superficie. Figura 10.

Para estabilizar los contaminantes BFRs en la fracción plástica de RAEE, se agregó carbón activado a la mezcla cementicia de preparación del AS en una proporción del 3% respecto del total de la mezcla. Las muestras de P1, P2 y P3 (que contiene carbón activado) se sometieron a una extracción en agua a 50 °C, luego se ajustó el pH a 2 y se extrajo con hexano para la determinación analítica de los

Figura 10. Descomposición de BFRs en medio básico

BFRs (principalmente Tetrabromobisfenol-A – TBBA-) por Cromatografía Gaseosa acoplada a Espectrometría de Masas (CG-MS), Tabla 8.

Como se puede observar, la muestra de plástico de RAEE arrojó un valor significativamente menor que las muestras de P1 y P2 en las cuales la matriz cementicia promueve la liberación de los BFRs por las características básicas. En la muestra P3 el carbón activado actuó como estabilizante y por tanto inhibió la liberación de este compuesto químico.

Tabla 8: cuantificación de BFRs por CG-MS.

Muestra	BFRs, ppm
RAEE	46,3
P1	169,1
P2	152,3
P3	<LOQ

LOQ: Límite Optimo de Cuantificación

Conclusiones parciales

• Se desarrolló una tecnología alternativa al enterramiento o disposición final de un residuo peligroso que contamina químicamente la tierra y el ambiente.

• El AS muestra muy buenas propiedades mecánicas, con valores de resistencia a la compresión aceptables, menor que el árido tradicional, pero con un incremento importante con respecto al plástico solo.

• Los contaminantes presenten pueden ser estabilizados por la matriz cementicia, para el caso de los metales, pero los principales contaminantes orgánicos que son los retardantes de llama se desestabilizan y es necesario utilizar algún estabilizante como carbón activado con el cual se logra inhibir la salida de los compuestos.

REFERENCIAS

1.- Gaggino R. Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. Revista INVI. 2008:137.

2.- Gaggino R., Kreiker J., Mattioli D., Arguello R. Emprendimientos de fabricación de ladrillos con plástico reciclado involucrando actores públicos y privados. Revista AREA. 2015:11.

3.- Municipalidad de Junin. WEB: http://www.juninmendoza.gov.ar/?p=7299, 2013.

4.- Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. Waste Management. 2008;28:1835-52.

5.- M A., A. Aq., M. H., A Y. The addition of plastic waste in self-compacted concrete: a critical review. International Journal of Current Research. 2016;8 5

6.- Neville. Properties of Concrete: Pitman Publishing Ltd; 1981.

7.- Wu KR., Yan A., Yao W., Zhang D. The influence of RPCA on the strength and fracture toughness of HPC. Cement and Concrete Research. 2002;32:351-5.

8.- Meddah MS., Zitouni S., Belâabes S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. Construction and Building Materials. 2010;24:505-12.

9.- Gaggino R., Beretta H., Gatani M., Argüello R."Ladrillos, bloques y placas con plásticos reciclados para viviendas de interés social". Ponencia completa en Anales de la 16ª Congreso AATH. Editorial: UTN, Facultad Regional Mendoza.

10.- Devia, Leila. 2012. "Basura Electrónica: Los Riesgos de Consumir Y Descartar." Saber Como (108):2.

11.- Protomastro, G. F. 2007. "La Cadena de Valor de Los RAEE Estudio Sobre Los Circuitos Formales E Informales de Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos Y Electrónicos En Sudamérica." 1–87

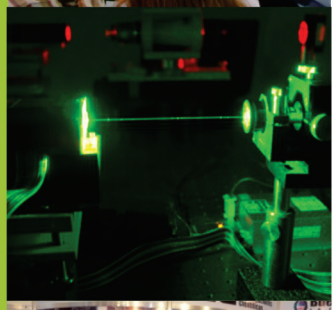
12.- Ongondo, F. O., I. D. Williams, and T. J. Cherrett. 2011. "How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes." Waste Management 31(4):714–30.

13.- Schlummer, Martin, Ludwig Gruber, Andreas Mäurer, Gerd Wolz, and Rudi van Eldik. 2007. "Characterisation of Polymer Fractions from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and Implications for Waste Management." Chemosphere 67(9):1866–76.

14.- Paria, S. and P. K. Yuet. 2006. "Solidification-Stabilization of Organic and Inorganic Contaminants Using Portland Cement: A Literature Review." Environmental Reviews 14(4):217–55.

15.- Kreiker, Jerónimo, Juan Cruz Carrizo, Sergio Ceppi, and Ruben Mutal. 2014. "Caracterización de Desechos Industriales Inorgánicos Para Se Usados Como Material Suplementario En Morteros Cementicios." P. 102 in III Taller Argentino de Ciencias Ambientales. Córdoba.

Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires



CIC

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación

Buenos Aires Provincia

Calle 526 e/ 10 y 11 - CPA B1906APO - La Plata, Provincia de Buenos Aires
Tel.: 0221 421 7374 - 482 3795 / 9581 - Fax: 0221 425 8383

www.cic.gba.gov.ar

LEMIT

LABORATORIO DE ENTRENAMIENTO MULTIDISCIPLINARIO PARA LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

52 e/121 y 122 - 1900 - La Plata - Argentina
Tel.: (54-0221) 483-1142 al 44 - Fax: (0221) 425-0471
direccion@lemit.gov.ar
www.lemit.gov.ar