

# 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<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *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 3° 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.

Evaluada 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 Comité 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-silice (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 500°C 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 adquirirían 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  $\mu\text{m}$  y 75  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  fue molida mediante un molino de bolas mientras que a la fracción de 75  $\mu\text{m}$  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 difracción 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, N° 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, N°s 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, N° 5. Paper ID JAI12849. [www.astm.org](http://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, N°6, 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*, N° 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](http://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](http://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. Santillán, 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 RILEM WEEK 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](http://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. VIII Congreso Internacional- 21ª Reunión Técnica de la AATH “Ing. Nélide 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, N° 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](http://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. VIII Congreso Internacional- 21ª Reunión Técnica de la AATH "Ing. Nélide 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.