

Influencia de agregados multi-reciclados en las propiedades del hormigón

C. J. Zega^a, M. E. Sosa^{a*}

^aConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, CP 1900, La Plata, Argentina. hormigones@lemit.gov.ar

Recibido: 9 de agosto de 2023

Aceptado: 18 de agosto de 2023

RESUMEN

Varios países han incluido en sus reglamentos el uso de residuos de hormigón triturado como agregado para la producción de hormigones. Los reglamentos permiten entre 20 y 100 % de agregado grueso reciclado (AGR) en lugar del agregado grueso natural (AGN). Cuando la vida útil de estos hormigones reciclados finalice se convertirán en un nuevo AGR y el ciclo del material reinicia. Las propiedades del AGR multi-reciclado no se han estudiado suficientemente. En este trabajo se realizaron cinco ciclos de reciclaje y se evaluaron las propiedades del AGR y su influencia en las propiedades mecánicas y durables de hormigones elaborados con 75% de AGR. La absorción de agua, la porosidad y la abrasión del AGR aumentan con los ciclos de reciclaje. El comportamiento mecánico de los hormigones convencionales y reciclados fue similar mientras que las propiedades elásticas y de permeabilidad se ven afectadas negativamente con el uso de agregados multi-reciclados.

PALABRAS CLAVE: Agregado reciclado, propiedades mecánicas, propiedades de transporte, absorción de agua, sostenibilidad

ABSTRACT

Several countries have included in their regulations the use of crushed waste concrete as coarse aggregate for new concrete production. Regulations allow between 20% and 100% of coarse recycled aggregate (CRA) instead of coarse natural aggregate (CNA). When the service life of these recycled concretes finishes, they will turn into a new CRA and the material cycle restarts. Thus, the properties of the multi-recycled CRA have not been sufficiently studied. For this research, five recycling cycles were carried out and the properties of CRA and its influence on mechanical and durable properties of concrete made with 75% of CRA were evaluated. Water absorption, porosity, and abrasion of CRA increase as recycling cycles increase. The mechanical behavior of concretes does not appear to be sensitive to the increase in recycling cycles, but elastic and permeability properties are adversely affected by the use of multi-recycled aggregate.

KEYWORDS: Recycled aggregate, mechanical properties, transport properties, water absorption, sustainability

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Zega, C. J., y Sosa, M. E. (2023). Influencia de agregados multi-reciclados en las propiedades del hormigón. *Revista Hormigón*, 64, 24–37. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/y9mxnivf1>

1. Introducción

El uso de agregado grueso reciclado (AGR), proveniente de la trituración de hormigones, como reemplazo del agregado grueso natural (AGN) en la producción de hormigón ha sido incluido en los reglamentos y recomendaciones en varios países [1-6]. Los porcentajes en que tal uso es permitido varían de país en país, permitiendo desde el 20 % al 100 % en función del nivel resistente del hormigón a producir. Las motivaciones para adoptar la práctica de uso de residuos son diferentes en cada país, pero generalmente se relacionan con el agotamiento de los recursos naturales, el impacto ambiental de la disposición de los residuos y el incremento en los costos de transporte de las materias primas, entre otros [7-8].

El uso de hormigones de desecho para la elaboración de nuevos hormigones es una práctica que se estima se incrementará en los sucesivos años, como consecuencia de la crisis ambiental actual [9-10]. Cuando estos hormigones reciclados finalicen su vida en servicio se convertirán en un nuevo hormigón de desecho y una nueva generación de AGR será producida. En post de disminuir la huella de carbono, la utilización de esta nueva generación de AGR resultará también necesaria. Las variables que influyen las propiedades del AGR son bien conocidas, así como también su influencia en las propiedades de los hormigones con ellos producidos. Sin embargo, con los sucesivos ciclos de trituración para producir AGR es necesario estudiar sus propiedades y como éstas influyen en el hormigón.

2. Marco teórico

2.1. *Propiedades del AGR e influencia en el hormigón*

El uso de AGR en la elaboración de hormigón ha sido ampliamente estudiado durante las últimas décadas. Sus propiedades, variabilidad y las mejores prácticas para su

uso son bien conocidas [11-12]. Como consecuencia del mortero adherido en sus partículas, el AGR presenta menor densidad y resistencia, y mayor absorción y desgaste en comparación con el AGN [13-14].

Estudios científicos recomiendan limitar el contenido de mortero adherido a 42 % para evitar mermas en las propiedades del hormigón en el que se emplea AGR [15]. Sin embargo, el criterio generalmente adoptado por las diferentes normas es limitar distintas propiedades o características del AGR tal como la absorción de agua, la densidad, la resistencia al desgaste y el contenido de impurezas. En la Tabla 1 se presentan los distintos requerimientos para el AGR y la resistencia máxima del hormigón producido con el mismo.

Respecto de las prácticas implementadas cuando se utiliza AGR en la elaboración de hormigón, la presaturación del AGR resulta más eficiente que compensar su absorción añadiendo al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la misma. De esta manera, se consigue mitigar las mermas en la trabajabilidad del hormigón sin perjudicar a su vez las resistencias mecánicas [16-19].

Respecto a las propiedades de hormigones reciclados en estado endurecido, mejoras en la ITZ han sido reportadas por diferentes autores [20-21]. Para porcentajes de reemplazo de AGN por AGR de entre 25 % y 75 % diversos autores han informado el mismo e incluso mayor nivel resistente en comparación con hormigones convencionales de análogas proporciones producidos con 100 % de AGN [15-16,19].

Los módulos de elasticidad estático y dinámico del hormigón tienden a decrecer conforme se incrementa el porcentaje de utilización de AGR [15-16,19]. Un comportamiento inverso es esperable respecto de la contracción por secado y la fluencia lenta [22-23]. No obstante, para porcentajes de reemplazo de hasta 30 %

Tabla 1. Requerimientos al AGR para su uso en hormigón de las normativas a nivel global.

País	Densidad (kg/m ³)	Absorción (%)	Impurezas (%)	Contenido de Cl ⁻ (%)	Máxima f' c ¹ del hormigón producido (MPa)
Australia	≥ 2100	≤ 6	≤ 5	---	40
	≥ 1800	≤ 8	≤ 5	---	25
China	---	≤ 10	≤ 5	0,03	35
	≥ 2500	≤ 3	≤ 2	0,04	45
Japón	≥ 2300	≤ 5	≤ 2	0,04	36
	---	≤ 7	≤ 3	0,04	24
Argentina	---	---	≤ 5	---	40
Bélgica	2100	≤ 9	≤ 1,5	≤ 0,06	30/37
Dinamarca	2200	---	≤ 5	---	---
USA	2000	≤ 10	---	---	50
Portugal	2200	≤ 7	≤ 10	0,08	35/45
Suiza	---	---	---	0,03	30/37

¹ f' c: resistencia media a compresión

ambas propiedades son similares a las de hormigones convencionales [15,24].

En cuanto a las propiedades de transporte, la absorción de agua, la absorción capilar y la penetración de agua del hormigón reciclado se ven afectadas no solo por el contenido de AGR (aumentando con respecto al hormigón convencional a medida que aumenta el contenido de AGR), sino también por la relación agua/cemento de la nueva mezcla [22].

2.1. Propiedades del AGR multi- reciclado e influencia en el hormigón

La segunda generación de AGR tiene diferentes propiedades en comparación con el AGR de primera generación como consecuencia de un mayor contenido de mortero en su composición [25-26]. Además, los AGR de segunda generación presentan una nueva zona de interfaz (ITZ) ya que existen matrices de diferentes composiciones;

la perteneciente al hormigón de origen y la del hormigón reciclado. Con el incremento en los ciclos de reciclado nuevas ITZ se producirán en los AGR multi-reciclados. Al respecto, Thomas et al. [25] encontraron que el contenido de mortero en el AGR de tercera generación fue 80% mayor que el de primera generación, a la vez que observaron una mayor cantidad de micro fisuras. El incremento en el contenido de mortero para el AGR de tercera generación fue también reportado por Zhu et al. [26] aunque de menor magnitud (55 %). En ambos estudios, el 100 % de AGR se utilizó en reemplazo del AGN en los hormigones reciclados. El contenido de mortero adherido podría ser menor con porcentajes de reemplazos menores al utilizado en los mencionados estudios. La cantidad y calidad del mortero presente en los AGRs determinan sus propiedades. Así, con el incremento en los ciclos de reciclaje es esperable una menor calidad de los AGR multi-reciclados. Sin embargo, diferentes estudios coinciden en que la densidad, la absorción y la resistencia

a la abrasión tienden a permanecer constantes con el incremento en los ciclos de reciclaje [25-27]. A pesar de ello, ninguna explicación sobre este comportamiento se ha expresado en los estudios mencionados.

Hormigones elaborados con AGR multi-reciclado mostraron menores resistencias a compresión que aquellos elaborados con AGN. Reducciones de entre 15 % y 40 % fueron reportadas cuando más de un ciclo de reciclaje se utilizó para generar los AGR [26-29]. La mayor cantidad de ITZ, microfisuras y porosidad del AGR multi-reciclado fueron indicadas como las responsables de este comportamiento. Por el contrario, Salesa et al. [30] encontraron incrementos del 13 % en la resistencia a compresión de hormigones reciclados con AGR obtenidos de hasta tres ciclos de reciclaje.

Las propiedades elásticas de hormigones con agregado multi-reciclado se ven adversamente afectadas, reportándose mermas de entre 12 % y 35 % en el módulo de elasticidad estático [27,29-30] y del orden del 15 % para el módulo dinámico [30].

Debido a la porosidad del mortero adherido y a su mayor contenido en los AGR multi-reciclados, las propiedades más afectadas debido a su uso son aquellas vinculadas a la durabilidad. No obstante, pocos estudios abordan la temática. Los pocos disponibles concluyen que al utilizar AGR de tercera generación se incrementa la absorción de agua del hormigón [30] y la penetración de cloruros, en tanto que la profundidad de carbonatación y la resistencia al congelamiento y deshielo disminuyen [26].

Resulta interesante notar que los estudios que concluyen mermas en las propiedades de transporte de los hormigones con AGR multi-reciclado utilizaron 100 % de reemplazo del AGN, resistencias de hormigones medias a altas (40 MPa a 55 MPa) y tres ciclos de reciclaje. Los resultados reportados no resultan sorprendentes si se considera que aun para AGR de primera generación se ha

concluido que el empleo de AGR no tiene la misma influencia en hormigones de distintos niveles resistentes (mayor influencia conforme menor es la relación a/c del hormigón producido). Así mismo cuanto mayor es el porcentaje de reemplazo mayores mermas en las propiedades de transporte fueron también reportadas para hormigones con AGR de primera generación. Más estudios, abordando porcentajes de reemplazo menores y diferentes niveles resistentes de los hormigones reciclados producidos, resultan necesarios para comenzar a entender cómo el incremento en los ciclos de reciclaje modifica las características de los AGR, así como también la influencia de estos cambios sobre las propiedades de los hormigones en los que se emplean.

En este trabajo se evalúan las propiedades de AGR obtenidos a partir de hasta cinco ciclos de reciclaje y la influencia de las mismas sobre distintos parámetros mecánicos y durables de hormigones de 25 MPa de resistencia a compresión cuando 75 % del AGN es reemplazado por AGR multi-reciclado. Los resultados obtenidos son vinculados con las características de los AGR en función de la cantidad de ciclos de reciclaje y con un hormigón patrón de similares proporciones.

3. Experimentación

3.1. Metodología

Se elaboró un hormigón convencional (HC-0) con 100 % de AGN. Luego de 28 días de curado en cámara húmeda ($T = 23 \pm 2$ °C y humedad relativa ≥ 95 %) este hormigón fue caracterizado, triturado y tamizado a través de la malla de abertura 4,75 mm obteniendo el AGR de primera generación (AGR-1), con igual tamaño máximo que el AGN. Este agregado fue caracterizado y posteriormente utilizado para elaborar un hormigón reciclado (HR-1) de análogas proporciones que HC-0. Después de curado idéntico al indicado para HC-0, el HR-1 fue caracterizado, triturado y

tamizado obteniéndose el AGR de segunda generación (AGR-2), el cual luego de caracterizado fue utilizado para la elaboración de un hormigón reciclado de segunda generación (HR-2). Este procedimiento fue repetido hasta generar cinco ciclos de reciclaje, obteniendo cinco AGR y sus correspondientes hormigones reciclados. La diferentes AGR se obtuvieron mediante trituración con trituradora de mandíbulas. En la Fig. 1 se presenta el esquema del proceso de trituración y producción de los agregados y hormigones reciclados.

Los agregados fueron caracterizados por medio de la determinación de la densidad y absorción de agua (IRAM 1520 [31]), desgaste “Los Ángeles” (IRAM 1532 [32]) y contenido de material menor a 75 µm (IRAM 1540 [33]). A cada hormigón producido se le determinó consistencia (IRAM 1536 [34]), peso por unidad de volumen (PUV) (IRAM 1562 [35]) y contenido de aire en estado fresco (IRAM 1602-2 [36]). En estado endurecido se determinó la resistencia a compresión a 28 días (IRAM 1546 [37]), módulo de elasticidad estático (IRAM 1865 [38]), densidad y absorción de agua, porosidad (ASTM C 642 [39]), velocidad y capacidad de succión capilar (IRAM 1871 [40]).

3.2. Materiales y mezclas

Para los hormigones se utilizó un Cemento Portland Compuesto de 40 MPa, arena silícea

como agregado fino (módulo de finura 2,50; densidad 2,61; absorción 0,8 %), piedra partida granítica como agregado grueso natural (T_{máx} 25 mm, densidad 2,62; absorción 0,4 %) y relación a/c = 0,50.

En los hormigones reciclados, 75 % (en volumen) del agregado grueso natural fue reemplazado por cada AGR obtenido del ciclo previo de reciclaje. Existe un consenso general respecto a que usar 100 % de AGR genera una disminución de las resistencias mecánicas del hormigón [13,41]. Debido a ello, el porcentaje de sustitución fue adoptado con el fin de maximizar el efecto del AGR en las propiedades del hormigón tomando en cuenta estudios previos donde la resistencia a compresión de hormigones convencionales y reciclados (con 75 % de AGR) fueron similares [42-44].

Para evitar cambios en el estado fresco de las mezclas debido a la absorción del AGR, 24 horas previo al mezclado, el agregado grueso (natural y reciclado) fue sumergido en agua a fin de utilizarlo en estado saturado a superficie seca (sss). De este modo, se evitan cambios en la relación a/c de los hormigones reciclados respecto del hormigón patrón y permite una comparación entre las propiedades de los hormigones, determinando la real influencia del uso de AGR y los cambios en función de los ciclos de reciclaje.

En la Tabla 2 se presentan las dosificaciones de los hormigones realizados.

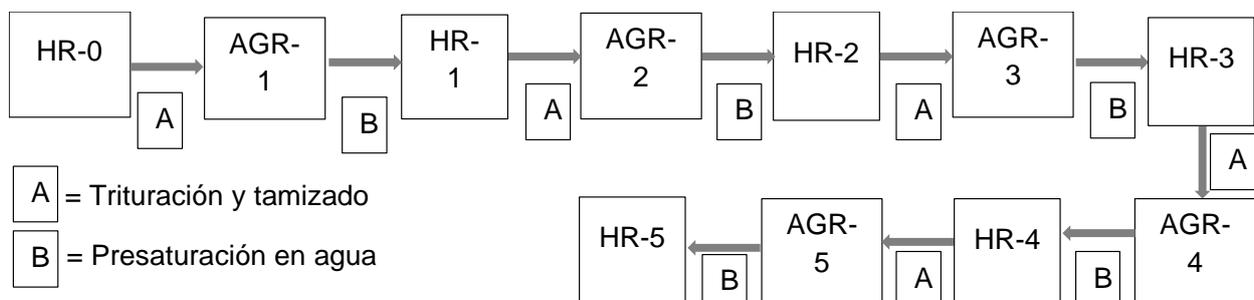


Figura 1. Esquema de producción de los AGR y hormigones reciclados.

Tabla 2. Proporciones de la mezcla (kg/m³).

Materiales	HC-0	HR-1	HR-2	HR-3	HR-4	HR-5
Agua	155	155	155	155	155	155
Cemento	311	311	311	311	311	311
Arena	885	885	885	885	885	885
AGN	1032	258	258	258	258	258
AGR-1	---	708	---	---	---	---
AGR-2	---	---	694	---	---	---
AGR-3	---	---	---	683	---	---
AGR-4	---	---	---	---	674	---
AGR-5	---	---	---	---	---	674

4. Resultados y discusión

4.1. Agregados

La granulometría de los agregados gruesos se presenta en la Fig. 2. Similar distribución de tamaño de partículas presentaron los AGRs independientemente de la cantidad de ciclos de trituración por la cual se obtuvieron. Respecto del AGN, los AGR presentan una distribución de tamaños más fina. Estas diferencias se deben a los distintos procesos de trituración empleados en laboratorio y en cantera. Como se mencionó anteriormente, los AGR fueron obtenidos mediante trituración con trituradora de mandíbulas, en tanto que el AGN es un agregado comercial.

La Fig. 3 presenta las propiedades de los agregados gruesos utilizados. Las diferencias en las propiedades del AGN y de los AGRs son claramente observables. Estas diferencias responden a la presencia de mortero adherido en los AGRs. Respecto a las diferencias en las propiedades entre los distintos AGRs, el comportamiento depende de la propiedad considerada. En el caso del contenido de material menor a 75 μm se observa que hasta el tercer ciclo de trituración es similar para los AGR y luego se incrementa significativamente. No obstante, a pesar de dicho incremento, los valores se mantienen

por debajo del 1 % lo cual cumple con los límites reglamentarios. Para el nivel resistente de los hormigones elaborados (~25 MPa) el mortero adherido es el material menos resistente del AGR, el incremento en el contenido de mortero incrementa la cantidad de zonas de ITZ conforme aumentan los ciclos de reciclaje [26] lo que podría explicar el aumento del contenido de finos. Así mismo, la poca significancia del incremento del contenido de finos cuantos más ciclos de reciclaje se aplican resulta esperable ya que aumentaría la cantidad de fracción del agregado fino reciclado producido, no conformando la fracción gruesa del agregado reciclado.

Hasta el tercer ciclo de reciclaje, la densidad disminuye mientras que la absorción, la porosidad y el desgaste aumentan conforme aumentan los ciclos de reciclaje. Para el cuarto y quinto ciclo las mencionadas propiedades tienden a permanecer constantes. Similar comportamiento de los AGR multi-reciclados fueron reportados por otros autores que estudiaron hasta tres ciclos de reciclaje [25-27,30]. Estos resultados pueden explicarse a partir del hecho que al incrementarse los ciclos de reciclaje la influencia del AGN es menor, por cuanto se incrementa el contenido de mortero total en el hormigón y consecuentemente las

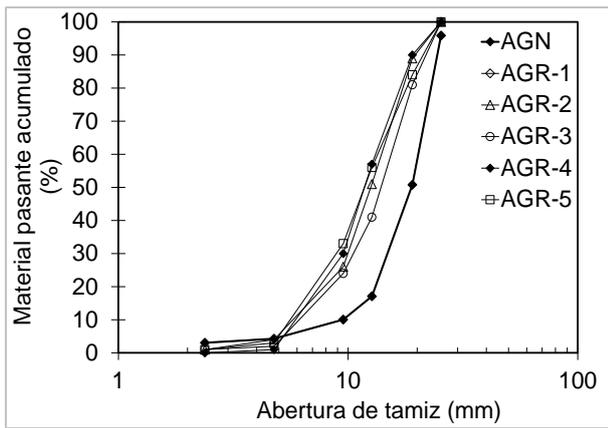


Figura 2. Granulometría de los agregados gruesos, natural y reciclados.

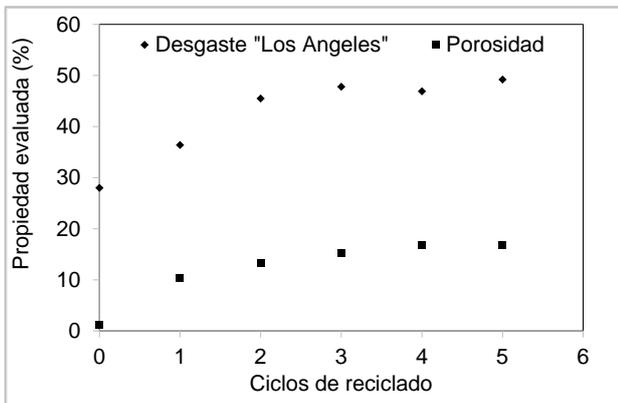
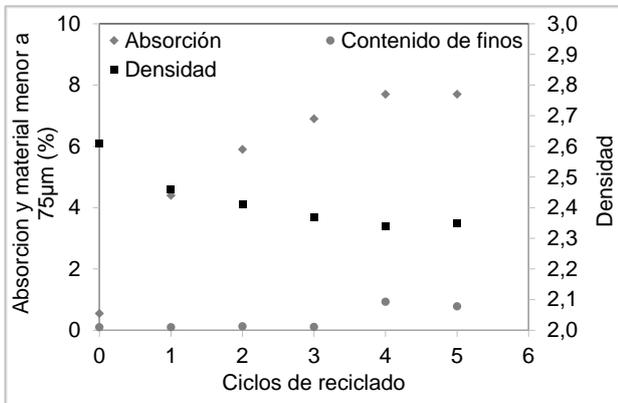


Figura 3. Propiedades de los AGRs multi-reciclado.

propiedades del AGR se acercan a las propiedades del mortero. En este trabajo, así como en los estudios citados, se utilizaron porcentajes altos de sustitución de AGN por AGR y la misma calidad de matriz en el hormigón patrón y reciclados. Por lo tanto, el número de ciclos para los que se alcanza el valor de convergencia en las propiedades del

AGR puede depender del nivel de sustitución, del tipo de agregado grueso natural y de las características de la matriz del hormigón elaborado.

La Fig. 4 presenta la relación entre la absorción de agua y otras propiedades de los agregados gruesos bajo estudio. La densidad y la porosidad guardan una relación proporcional con la absorción, directa en el caso de la porosidad (se incrementa conforme lo hace la absorción) e inversa en el caso de la densidad (disminuye con el aumento de la absorción). El desgaste "Los Ángeles" también mostró una relación proporcional y directa con el incremento en la absorción de agua. La cantidad de material menor a 75 µm no presentó una correlación clara con la absorción de agua, lo cual podría indicar que dicha propiedad guarda estrecha relación con el procesamiento utilizado para producir el AGR. La buena correlación obtenida entre la

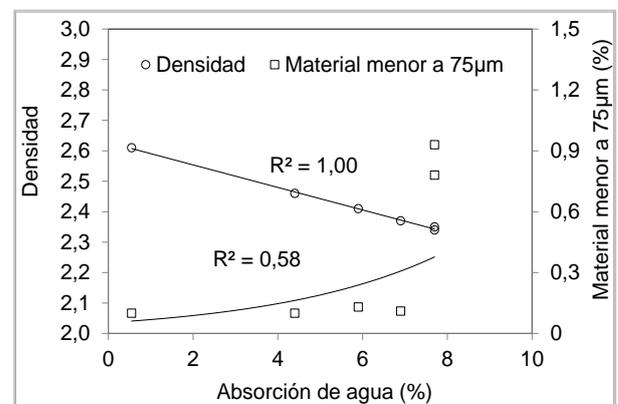
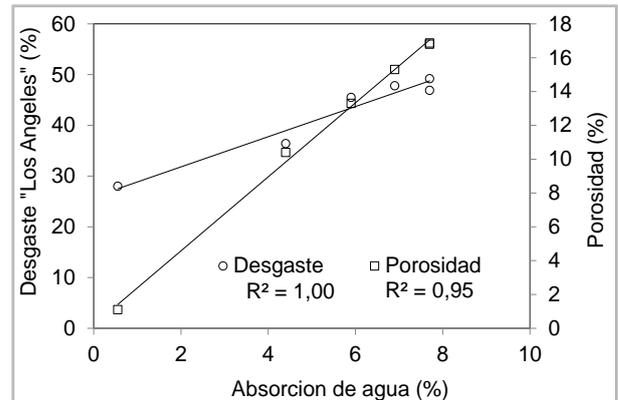


Figura 4. Relación entre la absorción de agua y otras propiedades de los agregados gruesos en estudio.

absorción de agua y otras propiedades del AGR podría indicar que esta propiedad es un buen indicador de la calidad del AGR, tal como fuera indicado previamente para la fracción fina del agregado reciclado [45].

4.2. Hormigones

4.2.1. Estado fresco

La Tabla 3 presenta las propiedades de los hormigones en estado fresco. El asentamiento de los hormigones reciclados de primera y segunda generación (HR-1 y HR-2) fue similar al del hormigón convencional (HC-0). Para los restantes hormigones reciclados se observa un menor asentamiento sin una tendencia clara respecto de los ciclos de reciclaje. Puesto que el AGR se utilizó en la condición sss, la merma en el asentamiento no puede atribuirse a la mayor absorción de agua como es usual en la literatura [46-48]. Leite et al. [49] sugieren que el menor asentamiento obtenido en los hormigones reciclados puede ser causado por la menor densidad del AGR en comparación con el agregado natural, ya que el asentamiento se ve influido por el peso propio de la mezcla. Sin embargo, diferencias en la forma y textura de las partículas, en el contenido de finos o una combinación de esos factores podrían ser los responsables del menor asentamiento obtenido [17].

El PUV de los hormigones reciclados disminuyó con el aumento de los ciclos de reciclado. Este comportamiento es consecuencia de la menor densidad del AGR como consecuencia del mortero adherido. El aire incorporado del hormigón reciclado fue superior al del hormigón HC-0 en todos los

casos. En promedio, el aire incorporado en los hormigones reciclados fue 0,4 puntos porcentuales superior al del hormigón convencional.

4.2.2. Propiedades en estado endurecido

En la Fig. 5 se presentan la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad estático de los hormigones en estudio. Puede observarse que todos los hormigones reciclados presentan una resistencia a compresión similar o incluso algo mayor que la del hormigón convencional. Estos resultados son contrarios a los reportados en otros estudios que utilizaron AGR multi-reciclado, en los cuales la resistencia disminuyó proporcionalmente con el aumento en los ciclos de reciclaje [26-28]. La diferencia entre los resultados en este estudio y los de la literatura podrían explicarse a partir de considerar que las ITZ no ejercen la misma influencia en hormigones de niveles resistentes como el aquí abordado que en hormigones de mayor nivel resistente como son aquellos estudiados en la literatura

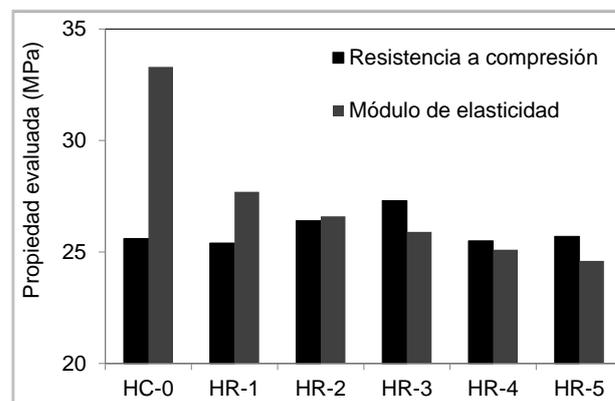


Figura 5. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad estático.

Tabla 3. Propiedades de los hormigones en estado fresco.

Propiedad	HC-0	HR-1	HR-2	HR-3	HR-4	HR-5
Asentamiento (mm)	95	90	85	70	70	60
PUV (kg/m ³)	2423	2323	2295	2286	2281	2279
Contenido de aire (%)	2,0	2,5	2,2	2,5	2,2	2,7

(45 MPa), en los que la ITZ juega un rol predominante.

El módulo de elasticidad estático de los hormigones reciclados fue entre 17 % y 26 % menor que el del hormigón convencional, mostrando además una tendencia decreciente al aumentar los ciclos de reciclaje. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de mayor contenido de zonas de ITZ y de mortero conforme se incrementan los ciclos de reciclaje. Esta misma tendencia en el módulo de los HR respecto al hormigón convencional fue reportada por otros autores al utilizar 100% de AGR multi-reciclados [27,29-30], aunque con disminuciones mayores a las indicadas en este trabajo.

En la Fig. 6 se presenta la densidad y absorción de agua (a) y la velocidad de succión capilar (b) de los hormigones en estudio. La densidad fue menor y la absorción mayor en los hormigones reciclados respecto del convencional. Las diferencias en ambas

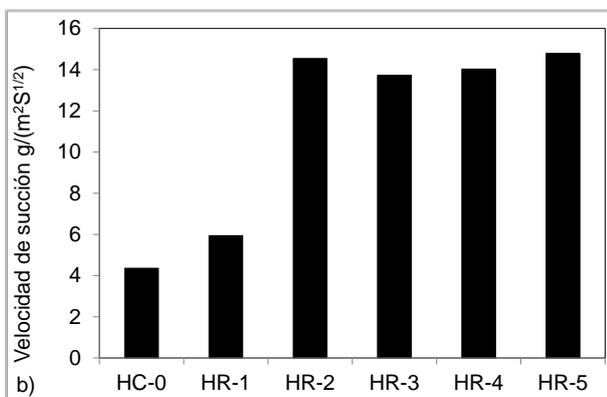
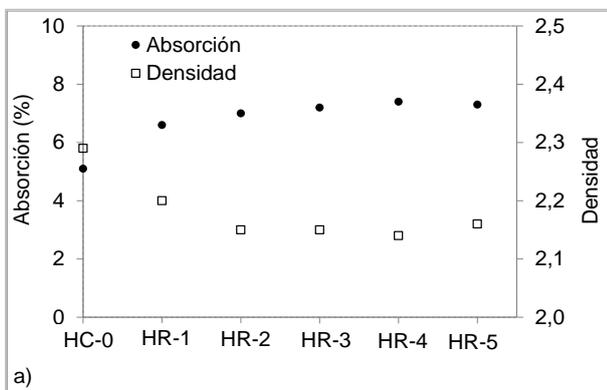


Figura 6. a) Absorción y densidad y b) velocidad de succión capilar de los hormigones en estudio.

propiedades tienden a incrementarse conforme lo hacen los ciclos de reciclaje, convergiendo en cada caso hacia un mismo valor a partir del tercer ciclo, tal como se observó en el caso del AGR (ver Fig. 3). Puesto que el mortero adherido en el AGR y la matriz de los hormigones presentan similares características, dado que la misma dosificación y materiales fueron utilizados, el valor de convergencia podría ser el correspondiente a las características de dicho mortero.

La velocidad de succión capilar fue un 36 % mayor en el HR-1 en comparación con el hormigón convencional, y con el incremento en los ciclos las diferencias se vuelven incluso mayores al 200 %. Tanto la absorción de agua como la velocidad de succión capilar están relacionadas con las propiedades de transporte en el hormigón. Mientras que la absorción de agua esta predominantemente determinada por los macro poros, la velocidad de succión lo está con los poros capilares. De los resultados aquí obtenidos, y en coincidencia con la literatura [26], es posible inferir que el uso de AGR multi-reciclado incrementa la porosidad capilar en mayor medida que los macro poros.

4.2.3. Relación entre las propiedades del AGR y de los hormigones

La absorción del agua del AGR resultó ser un potencial indicador de su calidad. Puesto que la calidad del AGR determina la influencia de este sobre las propiedades de los hormigones, en la Fig. 7 se presenta la correlación entre la absorción de agua y las propiedades del hormigón. Se incorporan en dicha figura los resultados reportados en este estudio (series Exp) y otros tomados de la literatura (se incluyen en ambos casos las propiedades de los hormigones patrones). Resulta evidente una buena correlación entre la absorción del agregado grueso y las propiedades de los hormigones tales como el módulo de elasticidad (Fig. 7a), la absorción, la velocidad de succión capilar y el coeficiente

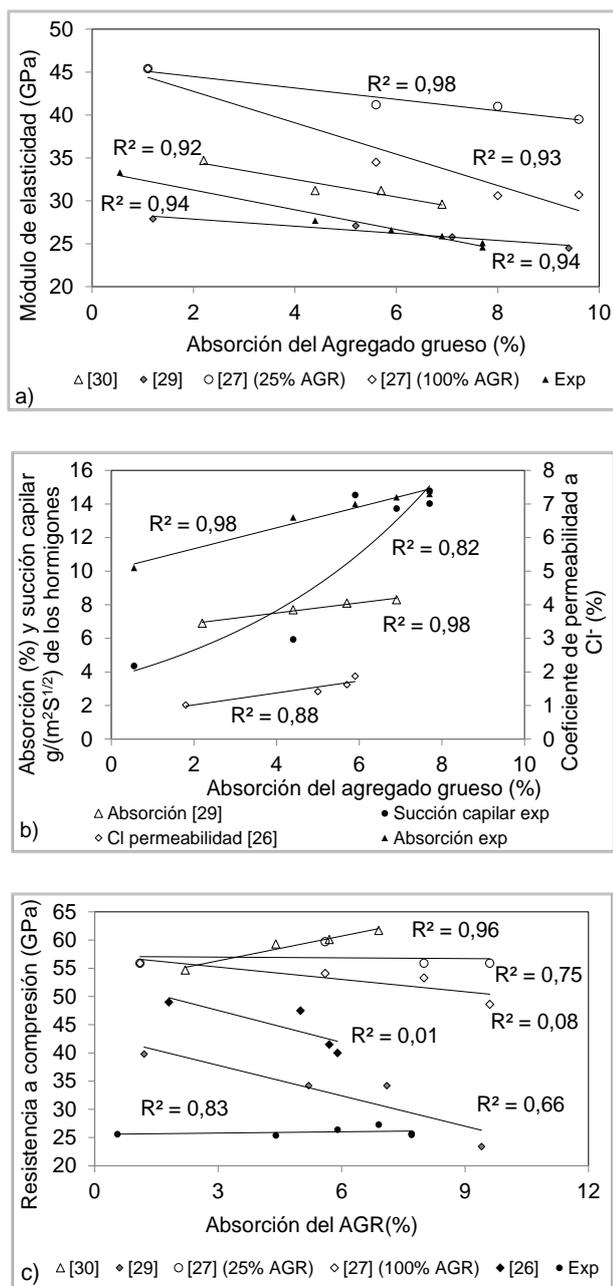


Figura 7. a) Absorción y densidad y b) velocidad de succión capilar de los hormigones en estudio.

de permeabilidad de Cl^- (Fig. 7b). Se observa también que, independientemente de los ciclos de reciclaje considerados, el nivel de resistencia a la compresión del hormigón reciclado o el porcentaje de AGR utilizado, las propiedades elásticas y durables del hormigón están directamente relacionadas con su porosidad. Ésta a su vez está influenciada por la porosidad del agregado grueso. Dado que el valor de absorción de agua del AGR es un indicador directo de la

porosidad, la buena relación entre la absorción del AGR y las propiedades del hormigón reciclado no resulta sorprendente.

Contrariamente, la resistencia a compresión de los hormigones no mostró una tendencia clara al vincularla con la absorción de agua de los AGR (Fig. 7c). En algunos casos la resistencia se incrementó conforme lo hizo la absorción en tanto que en otros no se observó una clara correlación o fue inversa a la indicada anteriormente. La resistencia a compresión de los hormigones es influenciada predominantemente por la relación a/c. En los datos presentados en la Fig. 7c se incluyen hormigones con diferentes relaciones a/c los cuales además contemplan distintas metodologías para compensar la absorción de agua de los AGR, por lo que la falta de una clara tendencia entre ambas variables podría deberse a ambos factores.

Estudios adicionales que contemplen otras características de los AGR multi-reciclados son necesarios a fin de incrementar los conocimientos sobre la influencia de los AGR multi-reciclados en el comportamiento mecánico de los hormigones, considerando que la posibilidad de utilizar AGR de 2da e incluso de 3ra generación es esperable en un futuro cercano. Una simple caracterización del AGR multi-reciclado basada en su absorción podría ser suficiente para controlar su variación de calidad, independientemente del número de ciclos de reciclado por el que se obtuvo.

5. Conclusiones

En este estudio se evalúan las propiedades de agregados grueso reciclados (AGR) obtenidos a partir de hasta cinco ciclos de reciclaje, analizándose también como esas propiedades influyen las características del hormigón en estado fresco y endurecido al reemplazar 75 % (en volumen) del agregado grueso natural (AGN) por AGR. De los resultados obtenidos en este estudio, los cuales son válidos para los materiales y

condiciones aquí contempladas, surgen las siguientes conclusiones:

- La distribución del tamaño de partículas de los AGR multi-reciclados fue similar entre sí, indicando que al igual que en los AGR de primera generación, la distribución de tamaños depende del proceso de trituración por el cual se obtuvieron.

- Las propiedades físico-mecánicas del AGR tales como la densidad, la absorción de agua, la porosidad y la resistencia al desgaste mostraron un menor desempeño con el incremento en los ciclos de reciclaje hasta el tercer ciclo y luego tienden a ser constantes. La inclusión del cuarto y quinto ciclo en este estudio permitió reafirmar la tendencia en cuanto a la estabilidad de las propiedades del AGR a partir del tercer ciclo de reciclado, sugerida en la literatura. Las propiedades de AGR con el avance de los ciclos tenderían a los valores del mortero adherido para porcentajes de reemplazos altos. Así mismo, las propiedades mencionadas mostraron una buena correlación con la absorción de agua, incluso para el cuarto y quinto ciclo, pudiendo convertirse tal propiedad en un indicador de la calidad del AGR. Estudios más profundos al respecto son necesarios para validar dicha propiedad como indicador de la calidad del AGR.

- A medida que aumenta el número de ciclos de reciclaje del AGR, el asentamiento y el peso unitario de los hormigones reciclados disminuyen levemente, principalmente desde el tercer ciclo en adelante. Dado que los AGR se utilizaron en condición sss, las diferencias en los resultados del asentamiento deben atribuirse a las diferencias en la forma, textura y contenido de finos del AGR en comparación con el AGN, o a una combinación de dichos factores.

- La resistencia a compresión de los hormigones convencionales y reciclados fue similar. La falta de influencia sobre esta propiedad del incremento en los ciclos de trituración se atribuyó a la similitud en la matriz de los hormigones y al limitado nivel

resistente de los hormigones elaborados (25 MPa). El módulo de elasticidad estático resultó sensible al incremento en los ciclos de reciclaje. Disminuciones de entre 17 % y 25 % fueron obtenidos en los hormigones reciclados respecto al hormigón patrón.

- La densidad del hormigón disminuyó mientras que la absorción de agua aumentó con el incremento en los ciclos de reciclaje. Las diferencias en los valores de ambas propiedades respecto al hormigón del ciclo anterior tienden a disminuir, convergiendo a un valor límite. Los valores de convergencia resultarían ser las propiedades del mortero adherido.

- La velocidad de succión capilar del hormigón con AGR de primera generación se incrementó un 36 % respecto del hormigón patrón. Para los ciclos subsiguientes, incrementos mayores al 200 % fueron obtenidos. Esto se atribuyó a la mayor porosidad capilar debido al mayor contenido de mortero presente conforme se incrementan los ciclos.

- La absorción de agua, el módulo de elasticidad y la velocidad de succión capilar mostraron una buena correlación con la absorción de agua del AGR, no solo para los resultados obtenidos en este estudio sino también para datos tomados de la literatura. Esta tendencia podría indicar que una simple caracterización del AGR resultaría suficiente para conocer a priori su calidad, independientemente de los ciclos por el cual se obtuvo. Estudios más específicos resultan necesarios para confirmar este comportamiento.

Referencias

- [1] Canadian Standards Association. (2009). *CAN/CSA A23.1-09 Concrete Materials and Methods of Concrete Construction*.
- [2] Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (RILEM) (1994). *Specifications for concrete with recycled*

- aggregates. *Materials and Structures*, 27, 557–559. <https://doi.org/c9gvzm>
- [3] Japanese Standards Association (2012). JIS A 5022 *Recycled concrete using recycled aggregate - Class M*.
- [4] Japanese Standards Association (2012). JIS A 5021 *Recycled aggregate for concrete - Class H*.
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2016). *IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo*.
- [6] Ministerio de Fomento (2008). *Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. Gobierno de España.
- [7] Martirena, F., Castaño, T., Alujas, A., Orozco-Morales, R., Martínez, L., y Linsel, S. (2017). Improving quality of coarse recycled aggregates through cement coating. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6(1), 69–84. <https://doi.org/kqjm>
- [8] Cantero Chaparro, B., Sáez del Bosque, I. F., Matías Sánchez, A., Sánchez de Rojas, M. I., y Medina, C. (2020). Effect of recycled aggregate on performance of granular skeleton. *ACI Materials Journal*, 117(2), 113–124. <https://doi.org/kqjn>
- [9] Zhang, L. W., Sojobi, A. O., Kodur, V. K. R., y Liew, K. M. (2019). Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117600. <https://doi.org/gjri5g>
- [10] Chen, W., Jin, R., Xu, Y., Wanatowski, D., Li, B., Yan, L., Pan, Z., y Yang, Y. (2019). Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Construction and Building Materials*, 218, 483–496. <https://doi.org/ghdf96>
- [11] Khoury, E., Ambrós, W., Cazacliu, B., Hoffmann Sampaio, C., y Remond, S. (2018). Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. *Construction and Building Materials*, 175, 705–713. <https://doi.org/kqjp>
- [12] Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., y Evangelista, L. (2019). Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 201, 110–120. <https://doi.org/kqjq>
- [13] Padmini, A. K., Ramamurthy, K., y Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829–836. <https://doi.org/cs9p23>
- [14] Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Tam, T. C., y Zhang, M. H. (2013). Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), 1795–1802. <https://doi.org/f5prn3>
- [15] Sánchez de Juan, M., y Alaejos Gutiérrez, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872–877. <https://doi.org/d66rjf>
- [16] Zega, C. J., y Di Maio, A. A. (2007). Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón. *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales*, 45(2), 1–11.
- [17] Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., y Jumaat, M. Z. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 796–810. <https://doi.org/kqjt>
- [18] Joseph, M., Boehme, L., Sierens, Z., y Vandewalle, L. (2015). Water absorption variability of recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research*, 67(11), 592–597. <https://doi.org/f7b2rw>
- [19] Kou, S., y Poon, C. (2015). Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 501–508. <https://doi.org/kqjv>
- [20] Poon, C. S., Shui, Z. H., y Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461–468. <https://doi.org/d68q5n>
- [21] Leite, M. B. (2001). *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. [Disertación doctoral,

Universidad Federal Rio Grande Do Sul].
Repositorio de Escola de Engenharia.
<http://hdl.handle.net/10183/21839>

- [22] Kou, S. C., y Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76. <https://doi.org/gpmnvi>
- [23] Manzi, S., Mazzotti, C., y Bignozzi, M. C. (2013). Short and long-term behaviour of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 37, 312–318. <https://doi.org/ghdftx>
- [24] Zega, C. J., Villagrán-Zaccardi, Y. A., y Di Maio, A. A. (2010). Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, 43, 195–202. <https://doi.org/fvp4m7>
- [25] Thomas, C., Setián, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., y Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054–1065. <https://doi.org/ghdfvb>
- [26] Zhu, P., Hao, Y., Liu, H., Wei, D., Liu, S., y Gu, L. (2019). Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 210, 442–450. <https://doi.org/kqjw>
- [27] Abreu, V., Evangelista, L., y de Brito, J. (2018). The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 480–489. <https://doi.org/kqjx>
- [28] Feng, J. C., Zhu, P. H., y Xia, Q. (2012). Mechanical behaviors of structural concrete using recycled aggregates from repeatedly recycling waste concrete. *Advances Materials Research*, 450-451, 1379–1382. <https://doi.org/kqjz>
- [29] Huda, S. B., y Alam, M. S. (2014). Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 574–582. <https://doi.org/kqj3>
- [30] Salesa, A., Pérez-Benedicto, J. A., Esteban, L. M., Vicente-Vas, R., y Orna-Carmona, M. (2017). Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. *Construction and Building Materials*, 153, 364–373. <https://doi.org/kqj4>
- [31] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2007). *IRAM 1520. Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.*
- [32] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2009). *IRAM 1532. Agregados. Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método "Los Ángeles".*
- [33] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2004). *IRAM 1540. Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 µm, por lavado.*
- [34] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2020). *IRAM 1536. Hormigón fresco de cemento. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.*
- [35] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2012). *IRAM 1562. Hormigón fresco de cemento. Método para la determinación de la densidad (masa de la unidad de volumen) y el cálculo del rendimiento y del contenido de aire (gravimétrico).*
- [36] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1988). *IRAM 1602-2. Hormigón de cemento pórtland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros. Método B.*
- [37] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013). *IRAM 1546. Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión.*
- [38] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2009). *IRAM 1865. Hormigón de cemento. Métodos de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson de probetas y testigos cilíndricos de hormigón sometidos a esfuerzos de compresión axial.*
- [39] American Society for Testing and Materials (2013). *ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete.*
- [40] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2021). *IRAM 1871. Hormigón.*

Método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido.

- [41] Lima, C., Caggiano, A., Faella, C., Martinelli, E., Pepe, M., y Realfonzo, R. (2013). Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. *Construction and Building Materials*, 47, 547–559. <https://doi.org/kqj6>
- [42] Di Maio, A. A., Zega, C. J., y Traversa, L. P. (2005). Estimation of compressive strength of recycled concrete with the ultrasonic method. *Journal of ASTM International*, 2(5), 1–8. <https://doi.org/cp3q28>
- [43] Zega, C. J., y Di Maio, A. A. (2006). Recycled concrete exposed to high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 58(10), 675–682. <https://doi.org/bgzhkq>
- [44] 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. *Construction and Building Materials*, 102(1), 714–721. <https://doi.org/kqj8>
- [45] Sosa, M. E., Carrizo, L., Villagrán Zaccardi, Y. A., y Zega, C. J. (2018). Water absorption of fine recycled aggregates as an indicator of their quality. En I. M. Martins, C. Ulsen, Y. Villagrán Zaccardi (Eds.), *IV International Conference on Progress of Recycling in the Built Environment* (pp. 414–421). RILEM.
- [46] Yang, K. H., Chung, H. S., y Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289–296. <https://doi.org/kqj9>
- [47] Barra de Oliveira, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado. [Disertación doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña].
- [48] Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., y Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 31–36. <https://doi.org/dzzcqt>
- [49] Leite, M. B., Figueire do Filho, J. G. L., y Lima, P. R. L. (2013). Workability study of concretes with recycled mortar aggregates. *Materials and Structures*, 46, 1765–1778. <https://doi.org/kqkc>