

¿Por qué el efecto del árido de hormigón reciclado en la resistencia a compresión del hormigón autocompactante no es homogéneo? Una revisión bibliográfica

Why is the effect of recycled concrete aggregate on the compressive strength of self-compacting concrete not homogeneous? A bibliographic review

Víctor Revilla-Cuesta ^(*), Vanesa Ortega-López ^(*), Marta Skaf ^(**), Francisco Fiol ^(**), Juan Manuel Manso ^(*)

RESUMEN

La presente revisión bibliográfica profundiza en cómo las características del Árido de Hormigón Reciclado (AHR) afectan al comportamiento resistente del Hormigón AutoCompactante (HAC) y cómo el efecto esperado del AHR puede alterarse por cambios en la composición del HAC. Se demuestra que, si la trabajabilidad del HAC se mantiene constante, la resistencia a compresión disminuye linealmente con el contenido de AHR, aunque este descenso será menor si el AHR procede del machaqueo de un hormigón de mayor resistencia. La disminución de la relación agua/cemento permite compensar esta pérdida de resistencia, aunque su valor debe permitir también mantener una adecuada trabajabilidad del HAC. La absorción de agua del AHR y su interacción con otros componentes incrementan la variabilidad del efecto del AHR. Debido a la gran cantidad de factores implicados en este comportamiento, es recomendable un estudio experimental del AHR y del HAC producido con él antes de su utilización.

Palabras clave: hormigón autocompactante; árido de hormigón reciclado; resistencia a compresión; dispersión de resistencia; sostenibilidad.

ABSTRACT

This literature review deepens in how the properties of Recycled Concrete Aggregate (RCA) affect the strength behavior of Self-Compacting Concrete (SCC) and how the expected effect of RCA can be modified by changes in its composition. It is demonstrated that, if the flowability of the SCC remains constant, the compressive strength decreases linearly with the RCA content, although this decrease is lower if the RCA is obtained from the crushing of a concrete with higher strength. The decrease of the water-to-cement ratio allows compensating this loss of strength, although its value should also allow keeping a suitable flowability. The water absorption of RCA and its interaction with other components of the mix increase the variability of the effect of RCA. Therefore, due to the large number of factors involved in this behavior, it is recommended to experimentally study the RCA and the SCC produced with it before its use.

Keywords: self-compacting concrete; recycled concrete aggregate; compressive strength; strength dispersion; sustainability.

(*) Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Burgos, Burgos (España).

(**) Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, Universidad de Burgos, Burgos (España).

Persona de contacto/Corresponding author: vrevilla@ubu.es (V. Revilla-Cuesta)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3337-6250> (V. Revilla-Cuesta); <https://orcid.org/0000-0003-0212-355X> (V. Ortega-López); <https://orcid.org/0000-0001-7205-2692> (M. Skaf); <https://orcid.org/0000-0002-7388-2839> (F. Fiol); <https://orcid.org/0000-0003-4964-5128> (J.M. Manso).

Cómo citar este artículo/Citation: Víctor Revilla-Cuesta, Vanesa Ortega-López, Marta Skaf, Francisco Fiol, Juan Manuel Manso (2022). ¿Por qué el efecto del árido de hormigón reciclado en la resistencia a compresión del hormigón autocompactante no es homogéneo? Una revisión bibliográfica. *Informes de la Construcción*, 74(565): e435. <https://doi.org/10.3989/ic.87668>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la sostenibilidad es uno de los principales desafíos a los que se enfrenta actualmente el sector de la construcción (1). Tanto los métodos constructivos como los materiales utilizados ocasionan grandes impactos medioambientales en diferentes ámbitos. Los impactos de los métodos constructivos abarcan la contaminación del lecho de los ríos o la deforestación. Por ello, es obligatorio redactar un estudio ambiental en todos y cada uno de los proyectos de construcción. En este documento se deben identificar todos los impactos ambientales producidos durante la construcción, definiéndose con precisión las medidas de mitigación necesarias. Además, debe establecerse un sistema de vigilancia que garantice el éxito de estas medidas (2). En relación con los materiales de construcción, el daño ambiental es causado fundamentalmente durante la fabricación de sus materias primas. Así, el betún utilizado en las mezclas asfálticas se obtiene durante el refinado del petróleo, durante el cual se emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera (3). El cemento, materia prima del hormigón, es una de las principales fuentes de emisión de CO₂, pues aproximadamente cada tonelada de cemento emite una tonelada de CO₂ a la atmósfera (4). Finalmente, el Árido Natural (AN) se obtiene de las graveras o canteras, con los consiguientes daños medioambientales en la zona de extracción (1).

Si nos centramos en las medidas adoptadas para aumentar la sostenibilidad de los materiales de construcción, una de las principales líneas de investigación es el uso de residuos y subproductos industriales para su fabricación (5). Hay un gran número de posibilidades, pero destacan dos residuos/subproductos como sustitutos del AN: la escoria de horno de arco eléctrico y el Árido de Hormigón Reciclado (AHR).

- La escoria de horno de arco eléctrico se obtiene durante el proceso de fabricación de acero a partir de la chatarra en hornos eléctricos. Su enfriamiento espontáneo en pozo de escoria resulta en un material granular que puede ser usado como sustituto del AN (6). Tiene una densidad, alrededor de 3,5 Mg/m³, muy superior a la del AN, la cual se encuentra alrededor de 2,6 Mg/m³, y una alta microporosidad. Además, presenta una gran dureza superficial, y las Zonas Interfaciales de Transición (ZIT) formadas entre estas escorias y la matriz cementicia o el betún, en hormigón y mezclas bituminosas, respectivamente, son de alta calidad (7).
- El AHR se obtiene mediante el machaqueo de elementos de hormigón desechados (prefabricación) o demolidos, tal y como se expone en un trabajo de los autores (8). Puede definirse como AN con mortero adherido, lo cual ocasiona que presente una densidad inferior al AN y una absorción de agua notablemente mayor (9). Cuanto menor es el tamaño de sus partículas, menor es su densidad y mayor su absorción de agua (10).

La sostenibilidad de estos materiales (hormigón y mezclas bituminosas) también se puede aumentar mediante su diseño. Por ejemplo, el hormigón generalmente necesita una vibración energética durante su puesta en obra para que se adapte a la forma del encofrado y expulse el aire contenido en su interior. Sin embargo, a principios del siglo XXI surgió el Hormigón AutoCompactante (HAC), caracterizado por su gran fluidez, capacidad de llenado y habilidad de paso (11). El parámetro habitualmente utilizado para clasificarlo es el escurrimiento, diámetro que alcanza la masa de hormigón tras

el ensayo del cono de Abrams. Este debe encontrarse entre 550 y 850 mm, clasificándose en tres clases según su escurrimiento de acuerdo con las recomendaciones de la EFNARC (12): >550 y <650 mm, clase de escurrimiento SF1; >650 y <750 mm, clase de escurrimiento SF2; y, >750 y <850 mm, clase de escurrimiento SF3. Así, el HAC es capaz de adaptarse al encofrado y pasar a través de las armaduras sin vibración. Esto reduce el consumo de energía durante su puesta en obra, lo que indirectamente reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Para el diseño del HAC debe obtenerse una pasta de cemento que arrastre uniformemente las partículas más gruesas de árido sin segregación (13). Para conseguirlo hay que equilibrar tres aspectos clave:

- Una adecuada proporción entre el árido grueso y fino añadido a la mezcla. Habitualmente el contenido de árido grueso debe ser inferior al contenido de árido fino, a diferencia de en el hormigón convencional (14).
- Debe añadirse un árido de fracción muy fina, que puede denominarse “filler”, que proporcione partículas menores de 0,25-0,50 mm. Estas partículas permiten obtener una pasta de cemento que arrastre las partículas de árido de mayor tamaño uniformemente (11). Este filler no es necesario si el árido fino empleado presenta ya la proporción necesaria de partículas de tamaño menor de 0,25-0,50 mm.
- Debe emplearse algún aditivo superplastificante, y definirse una relación agua/cemento (a/c) de aproximadamente 0,40-0,45 para conseguir un hormigón fluido (15). Además, el HAC también debe tener una viscosidad adecuada (ensayo del embudo en V) y habilidad de paso (ensayo de la caja en L) (12).

El uso de AHR en el hormigón vibrado disminuye su trabajabilidad debido a su mayor absorción de agua en comparación con el AN, lo que puede compensarse aumentando el contenido de agua del hormigón (16). La resistencia a compresión también disminuye debido a la aparición de ZIT con una menor adherencia entre las partículas de árido y la matriz cementicia. Asimismo, el uso de AHR fino también aumenta la porosidad del hormigón, lo cual reduce su resistencia (17). Sin embargo, este comportamiento no es tan claro en el HAC debido a su alta sensibilidad a cambios en su composición (15). Así, por ejemplo, la trabajabilidad del HAC puede no estar afectada significativamente por el uso del AHR si el contenido de partículas menores de 0,25-0,50 mm es elevado (18). Por otra parte, el uso del AHR puede aumentar la resistencia a compresión si se ajusta el contenido de agua del HAC (8).

A la vista de todo lo indicado, existen múltiples factores que afectan a la resistencia a compresión del HAC elaborado con AHR. Además, la interacción entre ellos puede modificar el efecto del AHR aunque se añada en la misma cantidad, dificultando su predicción. Este artículo pretende analizar en detalle todos estos aspectos. Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica de diferentes estudios en los que se utiliza AHR para producir HAC y se han identificado y explicado los diferentes factores que afectan a este comportamiento. También se analizan las interacciones entre ellos para explicar que el efecto de añadir al AHR no es homogéneo. El objetivo final es explicar cómo cada cambio en la composición del HAC modifica su resistencia a compresión, mostrar que aspectos detectados en el hormigón vibrado convencional con AHR también se producen en el HAC y, finalmente, destacar aquellos aspectos particulares este tipo de hormigón cuando se incorpora AHR.

2. FACTORES DE DISPERSIÓN DE LA RESISTENCIA

La revisión bibliográfica permitió identificar cinco aspectos que condicionan notablemente la resistencia a compresión de HAC con AHR: el contenido de AHR (15); la calidad del hormigón machacado para producir AHR (19); la relación a/c y, por tanto, la fluidez del HAC (8); la interacción del AHR con el filler y las adiciones minerales (20); y, por último, el curado interno originado por el AHR (21).

2.1. Contenido de Árido de Hormigón Reciclado (AHR)

El AHR es un subproducto obtenido a partir de la trituración y tamizado de elementos de hormigón rechazados (22). Por una parte, puede obtenerse de la demolición de edificios o estructuras existentes, lo que provoca que en este caso se mezcle con otros residuos como ladrillo o vidrio (10). Solo si estos otros materiales se encuentran en una proporción inferior al 10 % este material puede considerarse AHR. Por otro lado, el AHR también puede obtenerse de elementos de hormigón rechazados por defectos estéticos o geométricos, así como de excedentes de hormigón, de la industria de la prefabricación (8). El AHR tiene una densidad inferior a la del Árido Natural (AN), alrededor de 2,4 Mg/m³, mientras que su absorción de agua, alrededor del 5-7 % en peso, es notablemente mayor (23). Además, cada fracción de este subproducto (grosso y fino) tiene propiedades particulares.

- La fracción gruesa (>4 mm) tiene mortero adherido al propio AN, lo cual explica la mayor densidad, la menor absorción de agua y la mayor porosidad de esta fracción en comparación con el AHR fino (24). Este mortero adherido también provoca la aparición de las Zonas Interfaciales de Transición (ZIT), zonas de unión entre el árido y la matriz cementicia, menos densas y más débiles que al utilizar AN (25). La menor densidad del mortero adherido y su mayor porosidad causan este problema.

- La fracción fina (<4 mm) muestra un comportamiento intermedio respecto al descrito en el párrafo anterior. Mientras que las partículas más grandes tienen características similares a las de la fracción gruesa, las más pequeñas se mezclan con partículas de otros componentes (yeso, arcilla...) (18), cuya presencia es especialmente común en el AHR procedente de trabajos de demolición (8). La presencia de estos componentes es perjudicial para la resistencia de cualquier tipo de hormigón.

Por lo tanto, el AHR tiene diferentes desventajas en comparación con el AN, las cuales reducen la resistencia a compresión del HAC (26). Esta disminución es causada por múltiples factores. El uso de AHR grueso aumenta la porosidad de la matriz cementicia debido a la porosidad del propio mortero adherido (10), aunque el efecto más notable es el producido por la adición de AHR fino, el cual modifica la reología de la matriz cementicia y aumenta más notablemente su porosidad (27). Además, las ZIT más débiles originadas por el AHR favorecen el deslizamiento entre el árido y la matriz cementicia, generalmente por la zona del mortero adherido (25). Ambos fenómenos suelen combinarse, pues es habitual que el aumento de la porosidad causado por el AHR fino se produzca principalmente en la zona de las ZIT, debido a la discontinuidad existente entre los materiales (25). Todo ello provoca problemas de adherencia y despegue entre el AHR y la matriz cementicia en lugar de la rotura del árido, situación óptima que proporciona la máxima resistencia a compresión (18). Si las partículas de AHR se rompen en vez de despegarse, este fenómeno suele ocurrir a través del mortero adherido, zona más débil del AHR (17).

Todos los aspectos anteriores provocan una situación que puede considerarse lógica. El aumento del contenido de AHR, independientemente de la fracción utilizada y no modificándose la composición del HAC, lleva a una disminución de su resistencia a compresión (15). En general, el efecto negativo de la fracción fina es más notable debido a su mayor efecto tanto en las ZIT como en la porosidad del hormigón (28). Si al añadir el

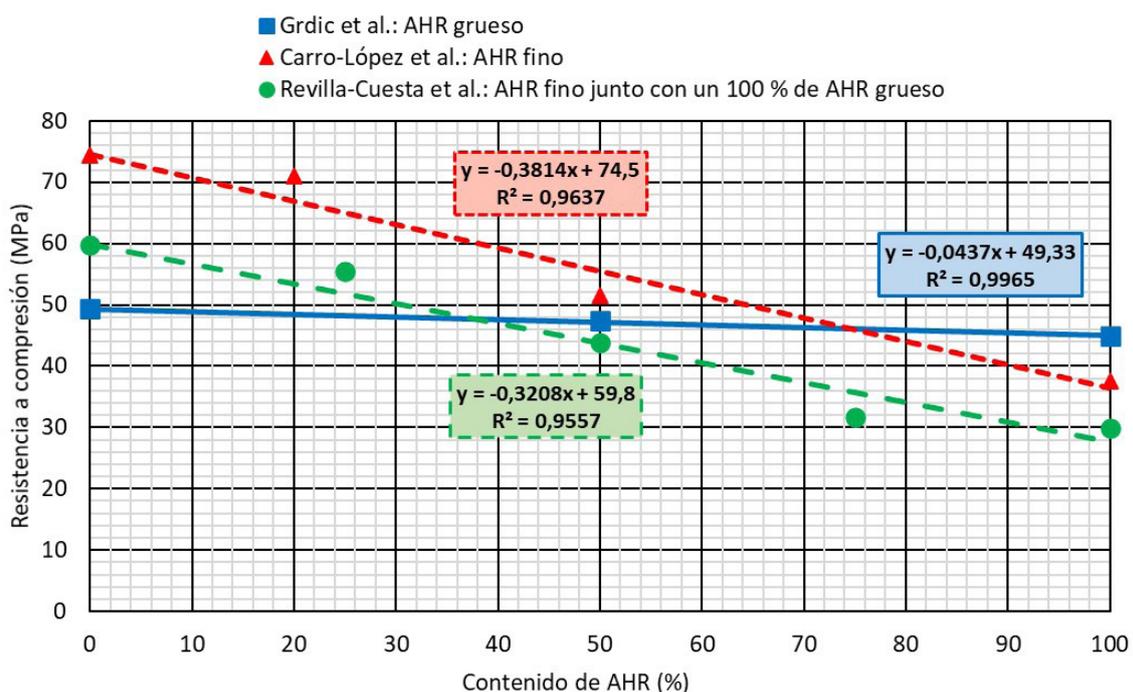


Figura 1. Ejemplos de disminución lineal de la resistencia a compresión del HAC al aumentar el contenido de AHR.

AHR la trabajabilidad del HAC se mantiene constante (véase la sección 2.3), la bibliografía existente muestra que la disminución de la resistencia se produce de forma lineal (29). Sin embargo, la pendiente de esta línea puede variar notablemente debido a numerosos aspectos, como las propiedades del AHR (pureza, resistencia del hormigón machacado...) (30), o la dosificación del propio HAC (14). Por tanto, un estudio preciso de las características del AHR es necesario para el uso correcto y seguro de este subproducto en la fabricación de HAC.

La Figura 1 muestra la evolución de la resistencia a compresión del HAC fabricado con diferentes contenidos de AHR según los resultados proporcionados en diferentes estudios. En cada estudio indicado se utilizaron diferentes fracciones de AHR: sólo AHR grueso (31), sólo AHR fino (32) o AHR fino junto con un 100 % de AHR grueso (18). Puede observarse que el ajuste lineal es adecuado en todos los casos, pues siempre se alcanzan coeficientes de correlación R^2 superiores al 95 %. Además, la pendiente de la línea es mayor cuando se utiliza AHR fino debido a su efecto más dañino para la resistencia a compresión del HAC. Por lo tanto, independientemente de las características particulares del AHR utilizado, la disminución de la resistencia es proporcional a la cantidad de AHR añadida si la trabajabilidad del HAC se mantiene constante.

2.2. Propiedades del hormigón de partida

En el campo del AHR, el término “*hormigón de partida*” hace referencia al hormigón del que se obtiene el AHR mediante machaqueo (33). En cada caso, este hormigón de partida puede tener una composición diferente, lo que conduce a que sus propiedades varíen notablemente (34). Por ejemplo, la resistencia a compresión del hormigón de partida puede ir desde el valor mínimo exigido por las normas internacionales para el hormigón estructural, 25 MPa (35), hasta resistencias del orden de 130-140 MPa (hormigón de altísima resistencia) (36). Esta diferente composición también ocasiona que el hormigón de partida pueda presentar una trabajabilidad diferente, que a su vez influye en la resistencia que desarrolla. Por otro lado, las materias primas son otro aspecto cuya variabilidad también es notable, pues en cada zona geográfica los áridos o el cemento que se producen y utilizan son diferentes. De este modo, tratar de definir unas reglas generales de cómo el hormigón de partida condiciona la resistencia a compresión del HAC es extremadamente complicado (37).

Esta gran variabilidad de la calidad y propiedades del AHR favorece que la resistencia a compresión del HAC presente una notable dispersión, lo que a su vez dificulta tanto su definición precisa como su posible predicción (15). No obstante, se puede establecer una regla clara: el uso de un hormigón de partida de mayor calidad, es decir, de mayor resistencia, da lugar a un AHR de mayor calidad (38), lo que hace que, en general, el HAC fabricado con él tenga una mayor resistencia (14). Este comportamiento está íntimamente relacionado con dos aspectos comentados en la sección anterior:

- En primer lugar, el uso de AHR procedente de un hormigón de partida de mayor resistencia origina la aparición de ZIT más resistentes. Dado que la zona más débil de las ZIT son los puntos de contacto entre el mortero adherido y la matriz cementicia, es la zona donde se suelen producir los problemas de adhesión entre ambos materiales/fases (39). Un mortero adherido de mayor resistencia, posible

gracias al uso de un hormigón de partida de mayor resistencia, hace que esta zona sea menos sensible a la aplicación de una fuerza y que el fallo no se produzca tan fácilmente (40).

- En segundo lugar, en los casos en los que el AHR se rompe en vez de experimentar fenómenos de despegue, es evidente que la situación más beneficiosa es la presencia de un mortero adherido que tenga la mayor resistencia posible (41). De esta manera, la rotura probablemente se producirá tanto a través del mortero adherido como a través del AN que compone el AHR. Esta situación es posible gracias a la mayor resistencia del mortero adherido (del hormigón de partida), que provoca que el conjunto de la partícula de AHR tenga un comportamiento más similar al AN (42). Esto a su vez resulta en un aumento de la resistencia a compresión del HAC fabricado con este subproducto.

En relación con estos aspectos, la fuente de la cual se obtiene el AHR (trabajos de demolición o elementos prefabricados) también es importante (8). El hormigón utilizado en la industria de los prefabricados suele tener una mayor resistencia debido a las características singulares de los elementos que se fabrican en ella. Además, la presencia de los contaminantes antes mencionados suele ser notablemente menor (24). Por lo tanto, el AHR procedente de la industria de la prefabricación tiene mejores propiedades para su uso (mayor resistencia, menor cantidad de componentes nocivos...), lo que conduce al desarrollo de HAC de mayor resistencia y, en general, con un mejor comportamiento en estado endurecido (43).

2.3. Relación agua/cemento, fluidez

El contenido de agua del hormigón se expresa generalmente a través del cociente entre la cantidad de agua y cemento añadida a la mezcla (relación agua/cemento, a/c) (35). Si se incluyen también las adiciones minerales con propiedades puzolánicas, como las cenizas volantes o la escoria de alto horno granulada molida, este cociente puede denominarse relación agua/conglomerante. En este caso, se consideran conglomerantes tanto el cemento como las diferentes adiciones minerales utilizadas para sustituirlo o complementarlo parcialmente (44). En el hormigón, la cantidad de agua añadida es esencial para dos propiedades diferentes.

- Por una parte, el contenido de agua añadida define la trabajabilidad de la mezcla (45). Así, en general, cuanto mayor sea el contenido de agua del hormigón, mayor será su trabajabilidad. Por lo tanto, en lo que respecta al HAC, cuanto mayor sea la relación a/c, mayor será la habilidad para fluir del HAC sin la aplicación de ninguna fuerza externa (46). Sin embargo, para obtener una fluidez adecuada en el HAC es necesario, además, considerar otros criterios de diseño indicados en la introducción (contenido adecuado de filler, relación correcta entre la cantidad de árido grueso y fino añadido a la mezcla, y la adición de una cantidad adecuada de aditivo superplastificante) (12).
- Por otra parte, la relación a/c también juega un papel fundamental en lo que respecta a la resistencia a compresión del hormigón. Un mayor contenido de agua conduce a una mayor dilución de las partículas de cemento y, a su vez, a una disminución de la resistencia (47). La relevancia de la relación a/c en la fluidez del HAC hace que la resistencia de este tipo de hormigón sea aún más sensible a la modificación de este parámetro (48).

Estos dos aspectos muestran que el contenido de agua en todos los tipos de hormigón, pero especialmente en el HAC, tiene que ser definido con precisión para lograr una adecuada trabajabilidad sin una gran pérdida de resistencia (49). De esta manera, ambas propiedades deben ajustarse a los requisitos establecidos para la aplicación en la que el hormigón será utilizado (35).

El AHR tiene características diferentes al AN, entre las cuales destaca, en relación con la trabajabilidad del hormigón, su mayor absorción de agua (28). Esto hace que el agua no absorbida por el árido se reduzca cuando se utiliza este subproducto si la relación a/c de la mezcla se mantiene constante (48). Esto provoca que haya una menor cantidad de agua disponible para reaccionar con el cemento, lo que a su vez resulta en una disminución de la trabajabilidad (31). Cuando se añade AHR, la trabajabilidad también se ve disminuida por la forma irregular de las partículas de este material, ya que esto ocasiona un aumento de la fricción entre los componentes de la mezcla (50). El aumento del contenido de agua también compensa parcialmente este fenómeno (51).

Tal y como se mencionó en la sección 2.1, el efecto de la utilización del AHR puede definirse con precisión manteniendo la trabajabilidad (fluidez) del HAC constante (15). Sin embargo, el diseño de un hormigón no tiene por qué cumplir este criterio, lo cual también favorece un aumento de la dispersión de su resistencia a compresión (35). Así, el uso de un 100 % de AHR sin una compensación total del agua absorbida a mayores como consecuencia de la mayor absorción de agua de este residuo en comparación con el AN puede permitir la obtención de un HAC con una resistencia a compresión superior a la del hormigón fabricado con un 100 % de AN (8). Esta solución es generalmente adecuada para el AHR grueso, ya que la presencia de componentes de naturaleza diferente al hormigón (ladrillo, yeso...) es generalmente reducida, incluso si procede de trabajos de demolición, por lo que no alteran el comportamiento esperado del AHR (24). Sin embargo, la situación es completamente diferente en relación con el uso del AHR fino, debido a su mayor influencia en la microestructura y la porosidad del HAC. Además, su contenido de componentes de naturaleza diferente al hormigón es mayor (18). Por tanto, tampoco se puede definir de forma totalmente precisa el efecto del contenido de agua al añadir AHR al HAC, especialmente cuando se utiliza la fracción fina de este subproducto. En resumen, el contenido de agua del HAC es otro parámetro que puede alterar el comportamiento resistente del HAC (14).

En línea con lo indicado en el párrafo anterior, es claro que la fluidez del HAC condiciona el efecto del AHR (15). Esto se debe a que la fluidez del HAC depende en gran medida de la cantidad de agua añadida a la mezcla y, generalmente, la disminución del contenido de agua del HAC, así como su absorción por parte del AHR van asociadas a una disminución de su fluidez y, a su vez, a un aumento de la resistencia. De este modo, la fluidez deseada condicionará la disminución de resistencia causada por el AHR. No obstante, a diferencia del hormigón vibrado convencional, una disminución mínima del contenido de agua puede dar lugar a un cambio muy significativo de la trabajabilidad, es decir, de la clase escurrimiento (12). La disminución del contenido de agua puede compensar la disminución de la resistencia causada inicialmente por el uso del AHR, pero inevitablemente esto causará una notable disminución de la fluidez del HAC (16). La

fluidez es el aspecto diferencial del HAC, y su modificación a altos niveles puede hacer que el uso de este tipo de hormigón no tenga sentido (11). Por lo tanto, es fundamental obtener un equilibrio entre el aumento de la resistencia y la reducción de la fluidez que provoca la no compensación total de la mayor absorción de agua del AHR.

A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra los resultados de un estudio realizado por *Fiol et al.* (8). Más concretamente, esta figura recoge los resultados de la serie de mezclas denominada RAC-30 en dicho artículo. En este trabajo de investigación, el contenido de agua no se aumentó al añadir AHR. Al absorber más agua el AHR que el AN, la relación a/c efectiva disminuyó conforme el contenido de AHR aumentó. De este modo, la no compensación del contenido de agua provocó un aumento de la resistencia cuando se añadieron diferentes contenidos de AHR procedente del machaqueo de elementos prefabricados de hormigón. Este aumento de la resistencia a compresión siguió una tendencia aproximadamente lineal, aunque la resistencia a compresión para un contenido de AHR grueso del 50 % fue ligeramente superior a la esperada. Sin embargo, la utilización de esta estrategia de no compensación de agua también dio lugar a una disminución significativa del escurrimiento del HAC. En este caso, la disminución del escurrimiento se ajustó adecuadamente a un modelo inverso de raíz cuadrada. El comportamiento descrito muestra claramente la necesidad de encontrar el equilibrio entre estos dos aspectos, la fluidez y la resistencia, cuando el contenido de agua se ajusta para compensar el efecto, en principio negativo, del AHR.

Por último, también es importante destacar la utilidad de los procesos de mezcla por etapas para maximizar la fluidez del HAC. Estos procesos consisten en añadir los diferentes componentes de la mezcla de manera progresiva, no todos simultáneamente, y aplicar un proceso de mezcla intermedio (52). Un proceso de mezcla por etapas típico consiste, por ejemplo, en las dos etapas siguientes:

- Adición del AHR con una parte del agua (normalmente, el 70 % del agua de mezcla) y mezclado durante 3-5 minutos.
- Adición del cemento, del agua restante y del superplastificante. Mezclado durante otros 3-5 minutos.

Este procedimiento permite maximizar la fluidez del HAC al añadir AHR sin aumentar excesivamente el contenido de agua (32). La primera etapa maximiza la absorción de agua del AHR, de modo que su mayor absorción del agua en comparación con la del AN no afecte a la fluidez del HAC. En la segunda etapa se logra una hidratación efectiva del cemento, maximizando la fluidez, pero también la resistencia mediante la adición de agua explícitamente destinada a la hidratación del cemento. De esta manera, también se reduce la cantidad de agua adicional que debe añadirse para mantener constante la fluidez al añadir AHR (48). Esto a su vez permite reducir la pérdida de resistencia a compresión que experimenta el HAC cuando se añade este residuo (52). Así, el proceso de mezcla es otro factor que también favorece la dispersión de la resistencia a compresión.

2.4. Filler y adiciones minerales

Para obtener la autocompactabilidad, el hormigón debe tener un alto contenido de partículas menores de 0,25-0,50 mm (12). El cemento proporciona una proporción importante de

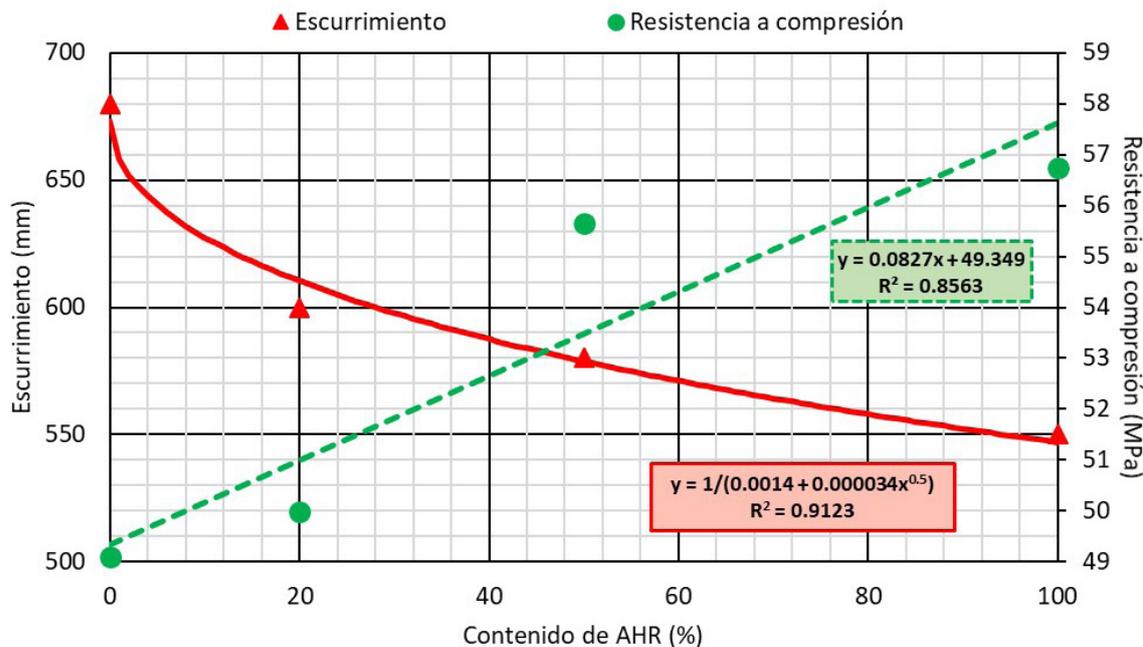


Figura 2. Evolución de la resistencia a compresión y de la fluidez del HAC al incrementar el contenido de AHR grueso. La relación a/c se mantuvo constante e igual a 0,45.

estas partículas, pero, en general, es necesario completarlo con la adición de un filler. El filler es una fracción de árido muy fina que proporciona las partículas de este tamaño (28). El filler más habitualmente utilizado es de naturaleza caliza, cuyo tamaño de partícula es inferior a 0,063 mm (18). Sin embargo, el uso de finos calizos 0/1,2 mm ha demostrado ser incluso una mejor opción porque permite crear una pasta de cemento muy compacta en estado fresco que arrastra eficientemente las partículas de árido más gruesas, incluso cuando se utilizan como árido materiales de alta densidad, como la escoria de horno de arco eléctrico (49).

El contenido de filler añadido al HAC no es una cuestión trivial, ya que este material también proporciona resistencia al HAC al complementar el cemento debido a su pequeño tamaño de partícula. Además, su adición en la cantidad correcta permite obtener una mayor fluidez al añadir una menor cantidad de agua, ya que permite crear una pasta de cemento con una alta capacidad de arrastre (53). Esto a su vez resulta en una menor dilución del cemento y en una mayor resistencia a compresión (14).

El tipo de filler que se añade también es relevante, especialmente cuando se utiliza el AHR fino. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el AHR tiene una influencia significativa en la reología de la pasta de cemento, por lo que su uso suele provocar un aumento de la microporosidad de las mezclas (27). Si no hay una afinidad óptima entre el filler y el AHR fino, que contiene partículas del mismo tamaño que el filler, esta microporosidad puede aumentar, lo que resulta en una disminución de la resistencia a compresión (52).

Al igual que la naturaleza del filler, el uso de adiciones minerales con propiedades puzolánicas tiene el mismo efecto (15). En el caso del HAC con AHR, la adición mineral cuyo efecto se ha estudiado con más detalle son las cenizas volantes, cuya combinación con el AHR amplifica la disminución porcentual

de la resistencia a compresión al incrementar el contenido de AHR (sin modificar el tipo y la cantidad de conglomerante utilizado al incrementar el contenido de AHR) (54). El aumento de la microporosidad de la mezcla debido a la interacción entre el AHR fino y las cenizas volantes explica este comportamiento (30).

2.5. Curado interno

Tal y como se ha indicado anteriormente, la absorción de agua del AHR es mayor que la del AN, lo que hace que este subproducto absorba una mayor cantidad de agua durante el proceso de mezcla (10). El agua absorbida por el árido no permanece indefinidamente en el interior del árido, sino que es liberada de forma diferida y lenta. Una parte de la porción de agua que se libera una vez que el hormigón ha endurecido se evapora. Otra parte permite que el cemento que no se hidrató de modo óptimo durante el proceso de mezcla lo haga. Por lo tanto, el AHR proporciona una mayor cantidad de agua de forma diferida a la matriz cementicia, lo que permite que la hidratación del cemento no efectivamente hidratado durante el proceso de mezcla se produzca posteriormente (55). Esto hace que el aumento de la resistencia a compresión del HAC elaborado con AHR a largo plazo sea más notable en comparación con el hormigón convencional (100 % de AN) (18). Este fenómeno se ve también condicionado por las condiciones de curado, es decir, por el ambiente exterior, al facilitar o no la evaporación del agua liberada por el árido (56).

En vista de lo anterior, la eficacia de este curado interno depende del nivel de absorción de agua del AHR (34). Así, el uso de AHR fino, con mayor absorción de agua que la fracción gruesa de este residuo (10), realiza un curado interno que aumenta la resistencia a compresión del HAC en mayor medida (57). Cuanto mejor sea este curado interno, mejor será la hidratación del cemento, lo que a su vez permite re-

ducir la disminución de la resistencia causada por el AHR, especialmente a largo plazo (57). Por lo tanto, la absorción de agua del AHR es otro factor que también favorece a la dispersión de la resistencia a compresión del HAC.

2.6. Visión global

Muchos factores influyen en la resistencia a compresión del HAC. Además, la gran sensibilidad de este tipo de hormigón en relación con todos los aspectos mencionados hace que el efecto de todos estos factores sea notable (22). La Figura 3 muestra el cociente entre la resistencia a compresión del HAC fabricado con AHR grueso y la resistencia a compresión de un HAC con la misma composición pero con un 100 % de AN (hormigón de referencia) según los resultados obtenidos en diferentes trabajos de investigación (8, 30, 50, 54, 58-62). Así, los valores inferiores a 1,00 corresponden a casos en los que la resistencia a compresión del HAC se redujo al añadir el AHR (resaltado en verde en la Figura 3), mientras que los valores superiores a 1,00 se refieren al HAC con AHR que presentaba una resistencia superior al hormigón de referencia (zona en amarillo en la Figura 3). Los estudios es los cuales el HAC fabricado con AHR presentó una mayor resistencia que el hormigón de referencia estuvo ligado a la disminución de la relación a/c efectiva, aunque la interacción del AHR con las cenizas volantes también fue beneficioso al añadir bajos contenidos de AHR (59). Esta figura representa claramente las ideas resaltadas en este artículo:

- En primer lugar, el efecto del AHR en la resistencia a compresión del HAC depende de muchos factores, como el contenido de AHR, la calidad de este subproducto, la cantidad de agua añadida a la mezcla e incluso la absor-

ción de agua del propio AHR. Por lo tanto, no se puede afirmar categóricamente si el uso del AHR aumentará o reducirá la resistencia a compresión del HAC, ya que esto dependerá en gran medida del diseño de la mezcla y de las características particulares de este material.

- Cualquier contenido de AHR puede llevar a la obtención de un HAC de mayor resistencia que el obtenido con 100 % de AN. Una vez más, esto dependerá de la composición de la mezcla y de la trabajabilidad que se desee obtener.

Por tanto, conocer la composición de la mezcla y, especialmente, la relación a/c efectiva, es fundamental para extraer conclusiones sobre el efecto del AHR. Si no, es posible que los resultados obtenidos lleven a conclusiones erróneas a la vista de lo recogido en la Figura 3. Esto muestra además que el ajuste de la composición de la mezcla puede permitir obtener un HAC que incorpora AHR con una adecuada resistencia, lo cual muestra que el uso de este subproducto en la fabricación de HAC puede ser adecuada si la composición de la mezcla se estudia en detalle.

3. CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se ha estudiado el efecto de la adición de Árido de Hormigón Reciclado (AHR) en la resistencia a compresión del Hormigón AutoCompactante (HAC). Este tipo de hormigón presenta una gran sensibilidad a cambios en su composición, por lo que el efecto negativo del AHR en la resistencia a compresión puede ser muy notable. Sin embargo, dicha sensibilidad también ocasiona que cualquier pequeño cambio afecte a la resistencia a compresión de forma diferente, haciendo que el efecto del AHR pueda diferir en gran medida del inicialmente esperado. De todo lo comentado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

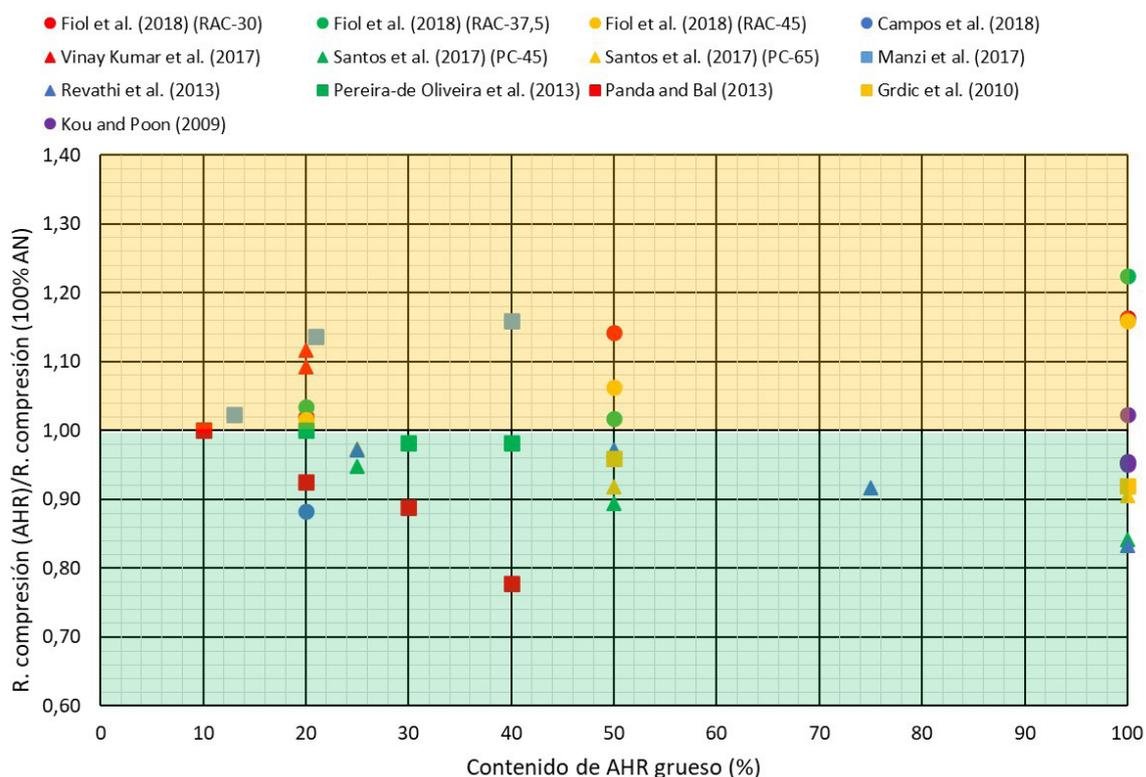


Figura 3. Dispersión de la resistencia a compresión del HAC con AHR.

- Si la trabajabilidad del HAC se mantiene constante, su resistencia a compresión disminuye linealmente con el contenido de AHR, independientemente de la fracción utilizada. Este descenso suele ser más notable cuando se utiliza AHR fino debido a la presencia de partículas de cemento alteradas o de naturaleza diferente al hormigón (ladrillo, yeso...).
- Cuanto mayor es la calidad (resistencia) del hormigón de partida del cual se obtiene el AHR mediante machaqueo, menor será la disminución de resistencia del HAC que se fabrique con él. El empleo de un hormigón de mayor resistencia hace que el comportamiento de este residuo se asimile más al árido natural.
- La no modificación del contenido de agua al añadir AHR puede permitir compensar la disminución de resistencia experimentada por el HAC al añadir AHR, especialmente cuando se utiliza la fracción gruesa de este residuo. Sin embargo, esto conducirá a una disminución de la fluidez del HAC, por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre el comportamiento deseado en estado fresco y endurecido.
- La interacción entre el filler utilizado para alcanzar la autocompactabilidad y el AHR fino también condiciona notablemente la resistencia a compresión del HAC. Una mala interacción puede provocar un incremento de la microporosidad, con la consiguiente disminución de la resistencia a compresión del HAC.
- Una mayor absorción de agua del AHR puede provocar que la disminución de resistencia esperada se vea reducida a largo plazo. Esto se debe a que una mayor absorción

de agua permite efectuar un notable curado interno y, con ello, una hidratación del cemento más eficiente.

Globalmente, el efecto de la adición de AHR al HAC no puede predecirse, ya que está condicionado por numerosos factores que dependen de la composición de la mezcla. La presaturación o prehumectación del AHR antes de su uso permite minimizar esta dispersión de la resistencia del HAC al reducir la influencia de la absorción de agua del AHR y es recomendable si se desea obtener un comportamiento resistente más homogéneo en este tipo de hormigón. Además, permitirá que la fluidez del HAC no disminuya de forma muy notable al añadir AHR. A pesar de ello, es recomendable estudiar de forma experimental el comportamiento del HAC al añadir AHR, definiéndose así el contenido y fracción de AHR a utilizar y comprobándose si este se ajusta a los requisitos exigidos.

4. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCINN), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo De Desarrollo Regional (FEDER) [código ayuda FPU 17/03374]; la Junta de Castilla y León (JCyL) y el Fondo Europeo De Desarrollo Regional (FEDER) [código proyecto UIC-231; BU119P17]; la iniciativa de empleo juvenil de la Junta de Castilla y León y el Fondo Social Europeo (ESF) [código ayuda UBU05B_1274]; y, finalmente, la Universidad de Burgos (UBU) [código ayuda SU-CONS, Y135.GI]. Los autores desean agradecer a todas estas instituciones su apoyo en este estudio.

5. REFERENCIAS / REFERENCES

- (1) Sandanayake, M., Zhang, G., Setunge, S. (2019). Estimation of environmental emissions and impacts of building construction – A decision making tool for contractors. *Journal of Building Engineering*, 21: 173-185. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.023>.
- (2) Costantini, M., Vázquez-Rowe, I., Manzardo, A., Bacenetti, J. (2021). Environmental impact assessment of beef cattle production in semi-intensive systems in Paraguay. *Sustainable Production and Consumption*, 27: 269-281. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.003>.
- (3) Skaf, M., Pasquini, E., Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V. (2019). Performance and durability of porous asphalt mixtures manufactured exclusively with electric steel slags. *Materials*, 12(20): 3306. doi: <https://dx.doi.org/10.3390/ma12203306>.
- (4) Maddalena, R., Roberts, J. J., Hamilton, A. (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*, 186: 933-942. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>.
- (5) Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68: 501-516. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.
- (6) Ortega-López, V., Fuente-Alonso, J. A., Santamaría, A., San-José, J. T., Aragón, Á. (2018). Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Construction and Building Materials*, 163: 471-481. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.121>.
- (7) Santamaria, A., Faleschini, F., Giacomello, G., Brunelli, K., San José, J. T., Pellegrino, C., Pasetto, M. (2018). Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. *Journal of Cleaner Production*, 205: 599-609. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.122>.
- (8) Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., Manso, J. M. (2018). The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 182: 309-323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132>.
- (9) Revilla-Cuesta, V., Fuente-Alonso, J. A., Hernández-Bagaces, J. J., Chica, J. A., Briz, E., Ortega-López, V. (2020). Performance assessment of a self-compacting concrete with coarse and fine recycled aggregate. *Hormigón y Acero*. doi: <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2742>.
- (10) Agrela, F., Sánchez De Juan, M., Ayuso, J., Geraldés, V. L., Jiménez, J. R. (2011). Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(10): 3950-3955. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027>.
- (11) Okamura, H., Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1: 5-15. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>.

- (12) EFNARC (2002). Specification Guidelines for Self-compacting Concrete, European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete.
- (13) Ouchi, M., Hibino, M., Sugamata, T., Okamura, H. (2000). Quantitative evaluation method for the effect of superplasticizer in self-compacting concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 22: 15-20.
- (14) Santos, S. A., da Silva, P. R., de Brito, J. (2019). Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review. *Journal of Building Engineering*, 22: 349-371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.001>
- (15) Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Faleschini, F., Manso, J. M., Ortega-López, V. (2020). Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 262: 121362. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121362>.
- (16) Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. K. (2018). Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 178: 19-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>.
- (17) Silva, R. V., De Brito, J., Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7): 825-849. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>
- (18) Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Skaf, M., Manso, J. M. (2020). Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 263: 120671. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120671>.
- (19) Wang, H., Zhang, N. (2016). Assessment of treated recycled concrete aggregates on the properties of recycled-aggregate-self-compacting concrete. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*, 48(6): 150-156. doi: <https://doi.org/10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.024>.
- (20) Sun, C., Chen, Q., Xiao, J., Liu, W. (2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161: 104930. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104930>.
- (21) Thotakura, L., Pullalacheruvu, S. K. R., Kodeboyina, G. B., Mupparisetty, V. K. R. (2021). Performance Characteristics of Self-cured Recycled Aggregate Concrete with SCM's. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 97: 745-754. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55115-5_68.
- (22) Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Chica, J. A., Fuente-Alonso, J. A., Ortega-López, V. (2020). Thermal deformability of recycled self-compacting concrete under cyclical temperature variations. *Materials Letters*, 278: 128417. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128417>.
- (23) Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., de Brito, J., Fiol, F. (2019). Micro- and macro-porosity of dry- and saturated-state recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 211: 932-940. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.243>.
- (24) Fiol, F., Thomas, C., Manso, J. M., López, I. (2020). Influence of recycled precast concrete aggregate on durability of concrete's physical processes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(20): 7348. doi: <https://doi.org/10.3390/app10207348>.
- (25) Jalilifar, H., Sajedi, F. (2021). Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 267: 121041. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121041>.
- (26) Fiol, F., Thomas, C., Manso, J. M., López, I. (2021). Transport mechanisms as indicators of the durability of precast recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 269: 121263. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121263>
- (27) Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E., Pellegrino, C. (2014). Rheology of fresh concretes with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 73: 407-416. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.068>.
- (28) Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Espinosa, A. B., Santamaría, A., Ortega-López, V. (2020). Statistical approach for the design of structural self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregate. *Mathematics*, 8(12): 2190. doi: <https://doi.org/10.3390/math8122190>.
- (29) Evangelista, L., De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2): 129-172. doi: <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>.
- (30) Santos, S. A., da Silva, P. R., de Brito, J. (2017). Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry. *Materials*, 10(8): 904. doi: <https://dx.doi.org/10.3390/ma10080904>
- (31) Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M., Ristic, N. S. (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 24(7): 1129-1133. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029>.
- (32) Carro-López, D., González-Fontboa, B., De Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., Silva, P. (2015). Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 96: 491-501. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.091>.
- (33) He, Z. H., Hu, H. B., Casanova, I., Liang, C. F., Du, S. G. (2020). Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 254: 119312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119312>.
- (34) Wang, Q., Geng, Y., Wang, Y., Zhang, H. (2020). Drying shrinkage model for recycled aggregate concrete accounting for the influence of parent concrete. *Engineering Structures*, 202: 109888. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109888>
- (35) EC-2 (2010). Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. *CEN (European Committee for Standardization)*.
- (36) Naeimi, N., Moustafa, M. A. (2021). Compressive behavior and stress-strain relationships of confined and unconfined UHPC. *Construction and Building Materials*, 272: 121844. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121844>.

- (37) Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5): 735-742. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.
- (38) Abed, M., Nemes, R. (2020). Los Angeles index and water absorption capacity of crushed aggregates. *Pollack Periodica*, 15(1): 65-78. doi: <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.7>.
- (39) Assaad, J. J., Matar, P., Gergess, A. (2020). Effect of quality of recycled aggregates on bond strength between concrete and embedded steel reinforcement. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(2): 94-111. doi: <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1692315>.
- (40) Ying, J., Han, Z., Shen, L., Li, W. (2020). Influence of parent concrete properties on compressive strength and chloride diffusion coefficient of concrete with strengthened recycled aggregates. *Materials*, 13(20): 4631. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13204631>.
- (41) Mistri, A., Bhattacharyya, S. K., Dharni, N., Mukherjee, A., Barai, S. V. (2019). Petrographic investigation on recycled coarse aggregate and identification the reason behind the inferior performance. *Construction and Building Materials*, 221: 399-408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.085>.
- (42) Ly, B. T., Far, H. (2019). Investigation on properties of coarse reclaimed aggregates and their effects on concrete strength and workability. *Structural Concrete*, 20(5): 1622-1630. doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201900014>.
- (43) Kebaili, O., Mouret, M., Arabia, N., Cassagnabere, F. (2015). Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: Evidence and analysis through an example. *Journal of Cleaner Production*, 87(1): 752-761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.077>.
- (44) Santamaría, A., Ortega-López, V., Skaf, M., Chica, J. A., Manso, J. M. (2020). The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1): 231-243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.10.001>.
- (45) González-Taboada, I., González-Fontebo, B., Martínez-Abella, F., Carro-López, D. (2017). Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box. *Construction and Building Materials*, 143: 537-546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.156>.
- (46) González-Taboada, I., González-Fontebo, B., Martínez-Abella, F., Seara-Paz, S. (2017). Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 157: 18-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.076>.
- (47) Santamaría, A., González, J. J., Losañez, M. M., Skaf, M., Ortega-López, V. (2020). The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 111: 103627. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103627>.
- (48) González-Taboada, I., González-Fontebo, B., Eiras-López, J., Rojo-López, G. (2017). Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. *Journal of Cleaner Production*, 156: 1-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.045>.
- (49) Santamaría, A., Orbe, A., Losañez, M. M., Skaf, M., Ortega-Lopez, V., González, J. J. (2017). Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate. *Materials and Design*, 115: 179-193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.048>.
- (50) Kou, S. C., Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31(9): 622-627. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>.
- (51) Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L. (2019). The effect of the quality of construction and demolition waste on recycled aggregates concrete properties. *Indian Concrete Journal*, 93(9): 17-29.
- (52) Güneysi, E., Gesoglu, M., Algin, Z., Yazici, H. (2014). Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 64: 172-183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.090>.
- (53) Nepomuceno, M. C. S., Pereira-De-Oliveira, L. A., Lopes, S. M. R. (2014). Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, 64: 82-94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.021>.
- (54) Revathi, P., Selvi, R. S., Velin, S. S. (2013). Investigations on Fresh and Hardened Properties of Recycled Aggregate Self Compacting Concrete. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 94(3): 179-185. doi: <https://doi.org/10.1007/s40030-014-0051-5>.
- (55) Wang, Q., Wang, Y. Y., Geng, Y., Zhang, H. (2021). Experimental study and prediction model for autogenous shrinkage of recycled aggregate concrete with recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 268: 121197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121197>.
- (56) Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Cimentada, A. I., Medina, C. (2018). Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 172: 618-625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.009>.
- (57) El-Hawary, M., Al-Sulily, A. (2020). Internal curing of recycled aggregates self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 275: 122911. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122911>.
- (58) Campos, R. S., Barbosa, M. P., Pimentel, L. L., Maciel, G. F. (2018). Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete. *Revista Materia*, 23(1): e-11964. doi: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0300>.
- (59) Vinay Kumar, B. M., Ananthan, H., Balaji, K. V. A. (2017). Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes. *Journal of Building Engineering*, 9: 100-108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.11.013>.

- (60) Manzi, S., Mazzotti, C., Bignozzi, M. C. (2017). Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. *Construction and Building Materials*, 157: 582-590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129>.
- (61) Pereira-de Oliveira, L. A., Nepomuceno, M., Rangel, M. (2013). An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates. *Informes de la Construcción*, 65(EXTRA 1): 31-41. doi: <https://doi.org/10.3989/ic.11.138>.
- (62) Panda, K. C., Bal, P. K. (2013). Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate. *Procedia Engineering*, 51: 159-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.023>.