



Propiedades físicas y mecánicas del concreto fabricado con agregado reciclado: Una revisión literaria.

Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate: A Literary Review.

Sócrates Pedro Muñoz-Pérez^{1*}, Álvaro Andrés Calderón-Coronel², Alex Jhann Carlos Caruajulca-González³, Oscar Rubén Huaman-Ticlla⁴

¹Doctor en Gestión Pública, Maestro en Geotecnia, Ingeniero Civil, msocrates@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú.

²Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, coronelalvar@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-7287-3527>, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo Perú.

³Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, cgonzalesalex@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-4817-9700>, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú.

⁴Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, hticllaoscar@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-2907-3775>, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú.

Cómo citar: S. P. Muñoz-Pérez, A. A. Calderón-Coronel, A. J. C. Caruajulca-González & O. R. Huaman-Ticlla, "Propiedades físicas y mecánicas del concreto fabricado con agregado reciclado: Una revisión literaria.", *Respuestas*, vol. 27, no. 1, pp. 38-56, 2022. <https://doi.org/10.22463/0122820X.3081>

Received August 19, 2021 - Accepted December 17, 2021

RESUMEN

Palabras clave:

Agregado Reciclado,
Concreto de Agregado
Reciclado, Propiedades
Físicas, Propiedades
Mecánicas.

Contemplando que la utilización de distintos agregados reciclados (RA) para la elaboración de concreto produce muchos beneficios ambientales por medio de la reducción de la cantidad de agregados naturales (NA) que son extraídos y la disminución en la cantidad de materiales de desecho. Este artículo de revisión presenta el análisis bibliográfico de los fenómenos producidos por los agregados reciclado (RA) y las propiedades que aporta al concreto. Mediante la indagación de diversos artículos de revistas publicadas en los últimos años se identificaron las propiedades físicas y mecánicas del concreto de agregados reciclados (RAC) a través de la evaluación de los ensayos de resistencia a la compresión, así como también tracción y flexión. El agregado reciclado (RA) evidencia valores inferiores de peso unitario suelto y valores superiores de absorción de agua que el agregado natural, se exhibe que el concreto fabricado con áridos naturales muestra una superior resistencia mecánica que el concreto de áridos gruesos reciclado (RCA). Los resultados de diferentes investigaciones indican que al aumentar el porcentaje de reemplazo de los agregados reciclados se disminuye proporcionalmente la resistencia y se dedujo que la cantidad óptima del reemplazo de RA en el concreto es de 50% y la sustitución máxima del agregado natural es del 50%.

ABSTRACT

Keywords:

Recycled Aggregate,
Recycled Aggregate
Concrete, Physical
Properties, Mechanical
Properties.

Considering that the use of different recycled aggregates (RA) for the manufacture of concrete produces many environmental benefits through the reduction of the amount of natural aggregates (NA) that are extracted and the decrease in the amount of waste materials. This review article presents the bibliographic analysis of the phenomena produced by recycled aggregates (RA) and the properties it contributes to concrete. Through the investigation of various journal articles published in recent years, the physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC) were identified through the evaluation of both compression resistance tests, as well as traction and bending. The recycled aggregate (RA) shows lower values of loose unit weight and higher values of water absorption than the natural aggregate, it is exhibited that the concrete made with natural aggregates shows a higher mechanical resistance than the recycled coarse aggregate concrete (RCA). The results of different investigations indicate that by increasing the replacement percentage of recycled aggregates, the resistance proportionally decreases and it was deduced that the optimal amount of AR replacement in concrete is 50% and the maximum replacement of natural aggregate is 50 %.

*Corresponding author.

E-mail Address: msocrates@crece.uss.edu.pe

(Sócrates Pedro Muñoz-Pérez)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

Introducción

La utilización de los residuos de materiales de construcción y la producción de nuevos materiales a base de materiales de desecho es calificado como reciclaje. El concreto es el elemento más importante y necesario en la elaboración de edificaciones, de este también depende la calidad de una estructura [1].

Debido a la evolución y desarrollo de nuevas tecnologías sustentables para el sector construcción es posible utilizar RA en varios elementos de concreto [2]. Por lo que es imprescindible comprender las características físicas y mecánicas del concreto fabricado a base de agregados reciclados y se debe tener conocimiento de las propiedades de dicho concreto: como la absorción de agua, la resistencia de tal forma que se evalúe la compresión al igual que la flexión y el módulo de elasticidad, etc. [3, 4, 5]. De la misma manera se deben llevar a cabo ensayos para los NA y también para los agregados reciclados, con la finalidad de conocer cómo influyen sus propiedades en la resistencia del concreto fabricado con agregado reciclado (RCA) [6].

El concreto reciclado es empleado como agregado grueso, su principal característica es que la totalidad de este son desechos y elementos de concreto que han sido destruidos [7, 8]. Las ventajas de emplear concreto con agregados reciclados es que economiza algunos gastos en la construcción y reduce la extracción de rocas [9].

En la actualidad algunos elementos de concreto son destruidos de manera parcial, en algunas ocasiones se destruye en su totalidad la estructura, esto se debe al cumplimiento de su vida útil o antigüedad [10]. La demolición de una estructura genera una gran cantidad de desperdicios sólidos que pueden ser aprovechados y empleados para la elaboración de un nuevo concreto. De tal manera que el concreto reciclado es usado como agregado en determinadas cantidades, lo que ayuda a reducir las cantidades de desechos [11, 12].

Cuando se verifica que el RAC puede ser empleado, el material sólido reciclado se destroza en pequeñas partículas por medio de una máquina trituradora, la pulverización del material se realiza en el lugar de la construcción, lo cual produce una reducción de los costos del transporte de los agregados al lugar de la obra, por lo que conviene aprovechar los materiales que se puedan reutilizar [13].

Los concretos de RCA son una opción para evitar la utilización de NA en el concreto. Los áridos del concreto reciclado son conseguidos mediante la reutilización de desechos de concreto en donde las cantidades de otros restos tienen que ser escasos o estar en bajos porcentajes [14, 15]. Generalmente el RCA es definido como un agregado reciclado que contiene residuos de mampostería y finos en un 5% como máximo, también puede contener material ligero u otros materiales desconocidos en un 0.5% [16].

El reemplazo de los agregados naturales en el concreto por los de RCA pueden ser en su totalidad o de manera parcial. No obstante, las utilizaciones de agregados reciclados finos absorben grandes cantidades de agua, como consecuencia disminuye la resistencia e incrementa de manera significativa la contracción del concreto. La gran cohesión de los RCA finos y los altos requerimientos de agua hacen que los controles de calidad del concreto sean complicados [17].

La conservación medio ambiental es un asunto de urgencia a nivel global, por ello las industrias de construcción han adoptado nuevas medidas sostenibles en la gestión de los residuos de demolición y la

reutilización de los agregados para la elaboración de concretos. Los agregados empleados son residuos de concreto, ladrillos de desecho, plásticos, mortero y escombros de demolición. El desaprovechar estos residuos provoca un efecto perjudicial para el medio ambiente, ya que se depositan en sitios inadecuados pudiendo contaminar el agua [18].

El incremento de la utilización de agregados reciclados por parte de las industrias de construcción, se debe a la necesidad de reducir algunos costos de los materiales y reutilizar los desechos de construcción. Al reemplazar los agregados naturales por agregados reciclados, se pueden conservar las propiedades del concreto y obtener un material más económico. En la actualidad existen varias normas europeas que muestran guías para el empleo de agregados reciclados en la fabricación del concreto [19, 20].

Diversos estudios realizados obtuvieron resultados incompatibles y distintos en relación con la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto fabricado con RCA, regularmente debido a los distintos métodos de trituración del agregado reciclado, la cantidad de desechos empleados en el concreto y la relación de agua-cemento [21]. Algunas investigaciones muestran que la resistencia a la flexión del concreto fabricado a través del uso de RCA es 10% inferior que la resistencia del concreto con agregados naturales, en cambio otros estudios mencionan que el RCA tiene un impacto despreciable en la resistencia a la flexión del concreto [22].

La principal diferencia entre el concreto elaborado con desechos y el concreto compuesto de agregados naturales (NA) es la presencia de una cubierta de masa de cemento residual en la cara externa del RCA, que, en consecuencia, perjudica las propiedades físicas y mecánicas de este concreto elaborado con agregados reciclados [23]. El empleo de los RCA en el concreto ocasiona una pequeña disminución en la resistencia a la compresión del concreto reciclado, principalmente en el momento en que se incrementa el nivel de reemplazo del agregado natural [24].

La utilización del RCA en estructuras de concreto es una manera apropiada de reducir los desechos de construcción y disminuir la contaminación ambiental. En los últimos años se han llevado a cabo numerosos estudios acerca de empleo del RCA para la producción un nuevo concreto. No obstante, algunos resultados demuestran que las incorporaciones de RCA provocan el debilitamiento de algunas propiedades mecánicas del concreto reciclado [25, 26].

El concreto con incorporaciones de RCA está agrupado dependiendo del tipo y cantidad de pasta de cemento, la antigüedad del agregado y la unión entre los agregados con la pasta de cemento. Estas disposiciones hacen que varíen las causas de falla en los concretos que poseen RCA. Se han realizado investigaciones que incorporan el RCA en porcentajes de 50% hasta el 100% del agregado, se demostró que el ángulo de inclinación del RCA es mayor que el ángulo de inclinación del agregado natural (NA). También se manifestó que la resistencia a la fractura del concreto con inclusión de RCA es menor que la del concreto tradicional [27].

Algunos estudios han demostrado que la resistencia a la fractura del concreto con RCA es inferior que la del concreto convencional, mientras que otros investigadores mencionan que el uso de RCA aumenta considerablemente la resistencia a la fractura. La incompatibilidad entre los resultados de diversos estudios hace que los efectos generados por el RCA en las características mecánicas del concreto sean dudosos [28, 14].

Metodología

El método de recolección de información del presente artículo, fue a indagación de artículos de investigación, por medio de la utilización de la base de datos de Scienedirect. Se realizó un análisis cualitativo documental de las investigaciones realizadas en torno a las características físicas y mecánicas de los concretos que son elaborados a base de agregados reciclados, para lo cual se utilizaron 59 artículos de diversos estudios, siendo publicados entre los años 2018 hasta junio del 2021, se tuvieron en cuenta las palabras clave relacionadas posteriormente: Recycled Aggregate Concrete, Physical properties, Mechanical properties y se seleccionaron según el tipo de documento como artículos científicos y artículos revisión; y también se tuvo en cuenta como área de investigación: Engineering, Materials Science. Sobre la base de los artículos seleccionados se analizaron los distintos criterios de los autores, resultados y conclusiones; para así lograr realizar este artículo de revisión.

Tabla I. Distribución de artículos según la base de datos y año de publicación.

| Base de datos | Año de publicación | | | | Total |
|----------------|--------------------|------|------|------|-------|
| | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | |
| Science direct | 11 | 37 | 10 | 1 | 59 |
| Total | 11 | 37 | 10 | 1 | 59 |

Fuente: Autor

Tabla II. Criterios de búsqueda y selección de artículos utilizados en la presente investigación.

| Base de Datos | Años de publicación | Palabras Clave | Tipo de documento | Documentos encontrados sin filtro | Áreas de investigación | Documentos encontrados con filtro | Documentos usados para la presente investigación |
|----------------|---------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Science direct | 2018 | Recycled Aggregate Concrete, Physical properties, Mechanical properties. | | 670 | | 458 | 11 |
| | 2019 | Recycled Aggregate Concrete, Physical properties, Mechanical properties. | Review articles, Research articles. | 768 | Engineering, Materials Science. | 523 | 37 |
| | 2020 | Recycled Aggregate Concrete, Physical properties, Mechanical properties. | | 1122 | | 791 | 10 |
| | 2021 | Recycled Aggregate Concrete, Physical properties, Mechanical properties. | | 1046 | Engineering. | 612 | 1 |

Fuente: Autor

Resultados y Discusión

Propiedades físicas de los agregados reciclados

Las incorporaciones de agregados reciclados al concreto generan una gran variación en las características físicas y mecánicas de los concretos con RAC. El volumen y la forma, al igual que la distribución de las partículas cumplen una función muy importante en la combinación de los agregados, ya que dependiendo de las características del agregado reciclado puede incrementar o disminuir las propiedades del concreto [29, 30].

Gravedad específica

Se ha demostrado que la gravedad específica de los agregados reciclados RCA son similares a las gravedades específicas habituales, los agregados reciclados utilizados poseen densidades que varían entre 2,2 a 3 gr/

cm³. Una disminución de la gravedad específica manifiesta una mayor porosidad del agregado, lo cual influye en la buena calidad del concreto y la resistencia. La cantidad de vacíos de los agregados reciclados deben ser analizadas según la ASTM C29/C29M [31].

Tamaño de las partículas

La repartición de la capacidad de las partículas depende del tipo de maquina pulverizadora que se emplee para triturar el agregado grueso reciclado [32]. O. Larsen et al. menciona que la distribución y los tamaños de las partículas del NA son similares a las de los agregados reciclados, no obstante, los agregados que se reutilizan son conseguidos de diferentes resistencias y tipos de concretos [33].

El aumento del contenido fino en las mezclas de cemento influye en su trabajabilidad, este puede disminuir debido al aumento en el área específica total de agregados finos. Por consiguiente, el uso de la fracción de la arena obtenida de rocas de desecho como agregados puede conducir a un aumento sustancial en la cantidad de agua requerida para lograr la consistencia deseada [34].

La investigación de Santos et al. demostró que los resultados de la distribución del agregado está en función al tamaño de sus partículas, sometiendo estos materiales a distintas temperaturas. Se observaron reducidas variaciones de 0 - 0.250 mm en la disposición del tamaño de las partículas más finas y una variación de 0,250 – 4 mm en las partículas gruesas originado por su exposición a varias temperaturas de calefacción [35].

Forma de las partículas

La configuración de la superficie, la textura de la partícula y la forma de los fragmentos de RCA están sujetos a la procedencia del concreto, método de reciclaje y la cantidad de series de trituración. Respecto a la textura de la partícula, se puede evidenciar que los agregados del RCA son rugosos así como los agregados naturales del concreto convencional [36, 37].

Aunque no existen investigaciones que comparen la textura de la superficie del RCA y la de los agregados naturales, diversos estudios mencionan que a causa de las masas de cemento adheridas a las partículas de agregado reciclado, la rugosidad en las caras exteriores del RCA es mayor que la del agregado natural [38]. A causa de la acumulación de aire libre en el agregado reciclado diminutas partículas tienden a conglomerarse, lo que genera una mayor cantidad de contacto entre partículas. Las configuraciones angulares de las partículas de RCA alterarán las propiedades del concreto debido a la resistencia que oponen las partículas para fluir y también intervienen en el modo de acopio entre las partículas angulares con las que tienen diferente forma [39].

En el procesamiento de los concretos de residuos de construcción se realiza diversas series de ciclos de trituración para seguidamente tamizar y eliminar las impurezas que puede contener el material. La diversidad de formas y la rugosidad de las partículas se debe al tipo de máquina de trituración (trituradora de mandíbula, trituradora cónica y trituradora de rodillos) y el número de veces que es triturado el agregado, lo que influye en la porosidad, densidad e incluso la absorción de agua del agregado [40].

Densidad y absorción de agua

La densidad del agregado RCA y la cantidad de absorción de agua son criterios importantes en el planteamiento de mezclas de concreto y de mortero [41]. Para precisar la cantidad de absorción de agua del RCA se utilizan diversos métodos, las pruebas de absorción de agua son muy dificultosas, esto por causa de las propiedades cambiantes del RCA, las características de la masa de cemento incorporada con los agregados reciclados y la cantidad de finos que posee el agregado [42].

Propiedades mecánicas del concreto que contiene agregados reciclados.

Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión del concreto que incorpora diversas dosificaciones de RCA y otros materiales de desecho varía dependiendo de la cantidad de reemplazo del agregado natural [43]. Cuando se aumentó la proporción de reemplazo del agregado natural (NA) por RCA, se evidenció una reducción de la resistencia a la compresión a los 28 días. En concretos que poseen una permeabilidad de diseño del 10% y 20% (sin escoria y 50% de adición de escoria) se sustituyó el agregado por RCA en un rango del 10-100%, lo cual produjo una disminución del 28-87% en la resistencia a compresión, lo cual manifiesta una reducción promedio del 12% por la sustitución del RCA a causa de la deficiente combinación entre el RCA con la pasta de cemento [44].

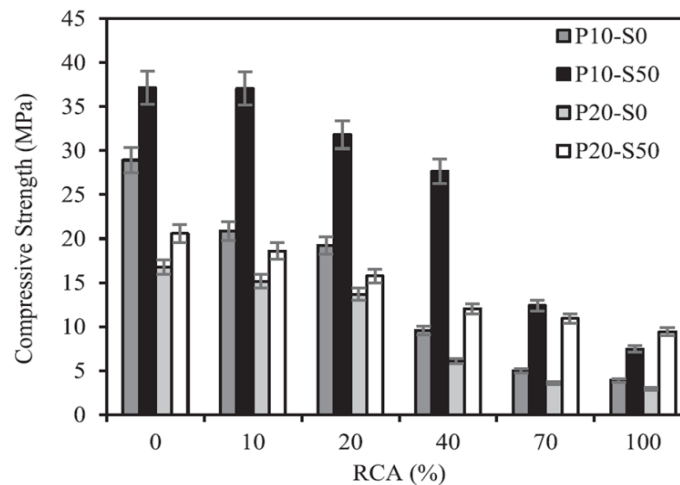


Figura 1. Resistencia a la compresión del concreto de 28 días.

La disminución sustancial de la resistencia a la compresión se debe al aumento del contenido de RCA en las mezclas de concreto auto-compactante (SCC). En general, se ha encontrado que la resistencia a la compresión reduce con la adición del RCA en todas las mezclas de SCC en todos los períodos del curado [45].

Las propiedades de las mezclas de concreto que tienen diversas dosificaciones de agregados reciclados con fracciones de 5-10 mm, muestran que la incorporación óptima de RCA en el concreto es del 22% y la presencia de materia orgánica en el RCA debe ser menor al 0.5%. El concreto producido con RCA muestra

una resistencia a la compresión promedio de 38 MPa a la edad de 28 días, esto indica que es posible utilizar desechos de concreto o material reciclado en la elaboración de un nuevo concreto [33].

La resistencia mecánica del concreto normalmente incrementa en relación a su edad, logrando llegar al 90% de su resistencia a la edad de 28 días. El reemplazo de RCA en un rango de 50% y 100 % generan resistencias a la compresión de 47 Mpa a 45 Mpa respectivamente, lo que evidencia que el concreto fabricado con agregados reciclados disminuye levemente su resistencia al momento de aumentar la cantidad de RCA. Estudios realizados del concreto auto-compactante muestran que, el incorporar RCA al concreto de agregados reciclados (RAC) en lugar de agregado fino natural, se obtiene una pérdida del 29% de la resistencia a la compresión, esto es debido a la mayor cantidad de agua que requieren los RCA y a la menor absorción de agua de los agregados finos naturales. La disposición de agregado fino en la mezcla colabora con el incremento de la resistencia del concreto debido a sus propiedades puzolánicas [35, 46].

Los resultados de los ensayos a la compresión presentados en la Figura 2. muestran que el concreto con adición de humo de sílice (SF) tiene una superior resistencia a la compresión en edades mayores a 14 y 28 días que los concretos que incorporan ceniza volante (FA) y relleno de piedra caliza (LF), esto se justifica por el retraso habitual de la actividad puzolánica. Comparando los dos concretos con incorporación de ceniza volante (FA), se puede observar que la resistencia es mayor cuando la relación de agua-cemento (W/C) es del 0.40 y cuando se aumenta la relación W/C aumenta (0.45) la resistencia disminuye gradualmente [35].

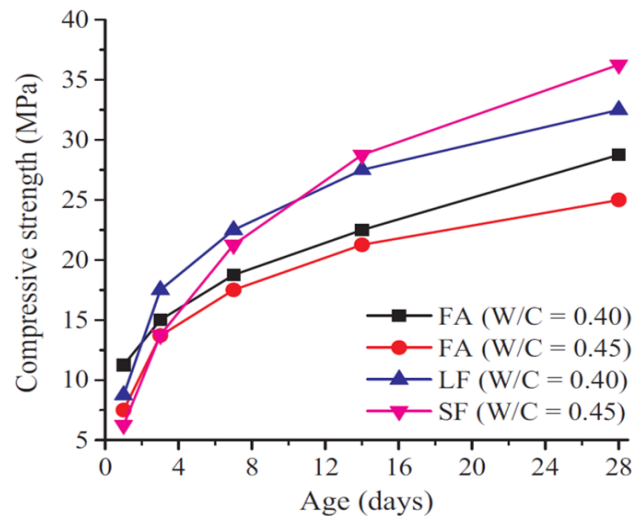


Figura 2. Resistencia a la compresión de 1, 3, 7, 14 y 28 días
Fuente: Santos, S. et al. (2019) [35].

El incremento de la relación agua-cemento produce la reducción de la resistencia a la compresión del RAC. Al momento de incorporar RCA en un 40% se puede apreciar un leve incremento en la resistencia, pero también se observó que su resistencia se disminuye a medida que aumenta la incorporación de RCA a partir del 60%, dado que los poros presentes en los RCA reducen las propiedades mecánicas del concreto [47].

La incorporación de RCA impacta ligeramente la resistencia a la compresión, se observa que los concretos elaborados con agregados naturales son 5% más resistentes mecánicamente que los concretos que incorporan

100% agregado reciclado. Los RCA no influyen de modo relevante en la resistencia del concreto a causa de la elevada cantidad de pasta de cemento que se combina con el agregado reciclado [48].

Se estableció que las propiedades mecánicas del concreto reciclado elaborado con agregados finos o gruesos 100% reciclados repetidamente siempre disminuyen gradualmente al aumentar el número de ciclos de reciclaje. Los efectos del comportamiento mecánico (resistencia a la compresión y tracción por división) de diferentes concretos a los 28 días se presentan en la Figura 3., se evidencia que el concreto con agregados reciclados (RAC) para cada ciclo puede alcanzar una resistencia de 40 MPa a los 28 días de edad [49].

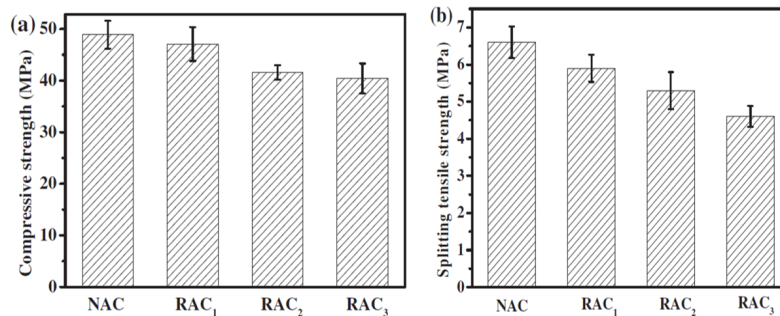


Figura 3. Resistencia a la compresión (a) y resistencia a la tracción por división (b) de NAC y RAC a 28 días. Fuente: Zhu et al. (2019) [49].

Kazemi et al. indican en su investigación que las muestras cúbicas de concreto con agregado natural y muestras con incorporación del 70% de agregados reciclados sujetos a curados húmedos y secos (a los 11, 28, 42 y 90 días). El rendimiento de las muestras de concreto sometido al curado húmedo son 35% más resistentes que las muestras curadas en seco, de la misma forma se probó que la resistencia del RAC es 47% menor que el concreto elaborado con agregado natural tanto en condiciones de curado húmedo y seco. Las pruebas semi-destructivas en el concreto son empleados para medir y evaluar las resistencias a la compresión de diferentes concretos. Las pruebas de núcleo son utilizadas en el lugar de construcción para lograr extraer muestras con diámetros de 100-150 mm, su resistencia puede ser alterada dependiendo de la relación longitud/diámetro de las muestras. Las pruebas de núcleo realizados al RAC manifiestan que la resistencia reduce un 19% en comparación a la resistencia medida mediante la compresión de muestras cubicadas [50].

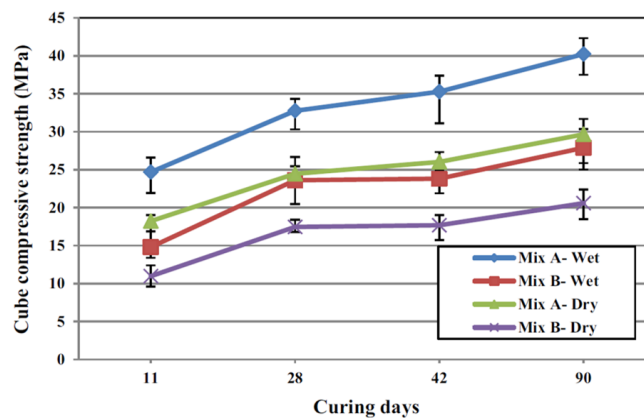


Figura 4. Resistencia a la compresión de la mezcla de control (Mezcla A) y RAC (Mezcla B) en condiciones de curado húmedo y seco. Fuente: Kazemi et al. (2019) [50].

Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción por rotura del RAC reduce con el aumento en la relación de W/C (0.40, 0.45 y 0.50 de W/C), el porcentaje de reemplazo de agregado se muestra en la Figura 5. Cuando el porcentaje de agregados de concreto triturado en la mezcla fue del 25%, la reducción en la resistencia a la tracción por rotura era aproximadamente del 2 al 8%. Con el aumento del contenido de agua, la zona de transición desarrollada es de peor calidad y, por tanto, la resistencia obtenida es menor [51]. Para la misma relación de W/C, se muestra que la resistencia a la rotura del RAC aumenta con el incremento del contenido de cemento. Esto puede atribuirse a una zona de transición interfacial más fuerte y una mejora en las propiedades de la pasta de cemento hidratada como resultado del aumento en el contenido de cemento [52].

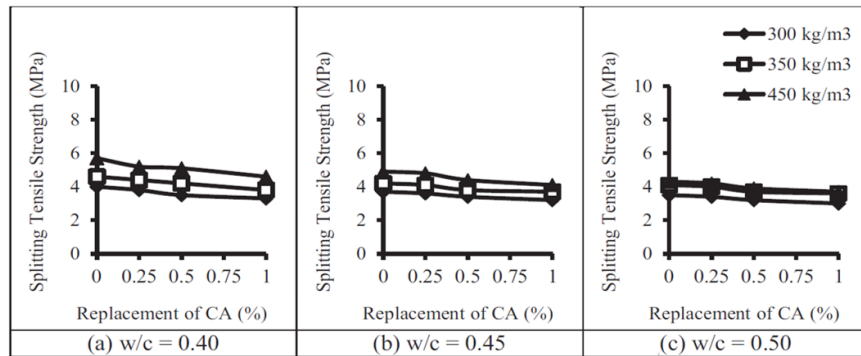


Figura 5. Efecto del reemplazo de agregados en la resistencia a la tracción por rotura del concreto.

Fuente: Thomas et al. (2018) [52].

Para las mezclas con una relación de incorporación del 100% de agregado grueso de concreto reciclado (CRCA), hay una marcada disminución en la resistencia a la tracción (de 4,18 MPa a 3,80 MPa) del concreto referencial producido con agregados naturales (RC) en comparación al concreto RAC con un primer ciclo de reciclaje (RAC1) y menos significativa de RAC1 a RAC con dos ciclos de reciclaje (RAC2) y de RAC2 a RAC con tres ciclos de reciclaje (RAC3), la resistencia a la tracción es de 3,80 MPa a 3.70 MPa y de 3.70 MPa a 3.55 MPa, respectivamente. Esto corresponde a una pérdida de rendimiento del 9,1%, 11,5% y 15,1%, para el primer, segundo y tercer ciclo de reciclaje, respectivamente [53].

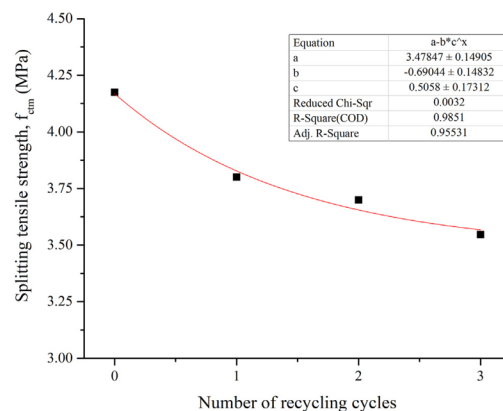


Figura 6. Variación de la resistencia a la rotura de las mezclas con un 100% incorporación de CRCA con los ciclos de reciclaje.

Fuente: Abreu et al. (2018) [53].

Resistencia a la flexión

La resistencia media a la flexión y su varianza obtenida de diferentes vigas de concreto sometidas al ensayo de flexión de tres puntos se evidencia en la figura 7. Los resultados indicaron que la disminución en la resistencia a la flexión de las muestras de RCA con 25% de sustitución del agregado grueso (RCA-25) y el RCA con 50% (RCA-50) de reemplazo del agregado grueso, la resistencia tubo una reducción del 10% y 14 % respectivamente, en comparación con la muestra de control. La tendencia similar también se encontró cuando se incorporó agregados de concreto reciclado tratado. Sin embargo, este agregado de concreto reciclado tratado con 25% (TRCA-25) y 50% (TRCA-50) de reemplazo del agregado natural causaron una reducción de solo un 3% en la resistencia a la flexión [29].

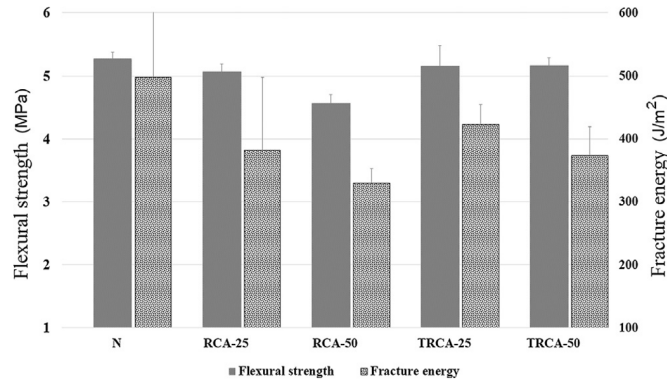


Figura 7. Resistencia a la flexión y variación de la energía de fractura para mezclas de concreto.
Fuente: Kazemian et al. (2019) [29].

Cuando el concreto convencional y el concreto RAC tienen el mismo grado de resistencia del concreto, el comportamiento a la fractura del hormigón RAC y del hormigón convencional es similar [54]. Cuando la proporción de reemplazo del RCA es menor al 70%, la tenacidad a la fractura del RAC no cambia. Sin embargo, cuando la relación de reemplazo del RCA es superior al 70%, la tenacidad a la fractura se reduce en un 10% como máximo. También se muestra que la energía de fractura del RAC es menor que la del hormigón convencional, al aumentar el porcentaje de reemplazo de RCA, la energía de fractura de RAC disminuye gradualmente y cuando el reemplazo del RCA es del 100%, la energía de fractura se reduce en un 24% [55].

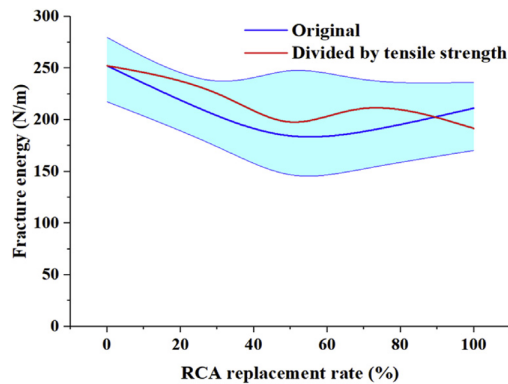


Figura 8. Energía de fractura.
Fuente: Li et al. (2019) [55].

Módulo de elasticidad

Se encontró que los módulos de elasticidad del concreto disminuyen con el aumento de los porcentajes de agregado reciclado en la mezcla [56]. El módulo de elasticidad se determina en la etapa de pre-fisuración. Las micro-grietas formadas dentro del agregado reciclado durante el proceso de trituración y también en la unión entre el agregado y el mortero viejo conducen a la reducción de la rigidez [57, 46], esto da como resultado un módulo de elasticidad más bajo en el hormigón que contiene agregados reciclados en comparación con el hormigón que contiene agregados naturales. En las mezclas de control, la adherencia entre los agregados naturales y el mortero de cemento es relativamente más fuerte que la adherencia del RA y por lo tanto presenta mejores propiedades elásticas. La reducción máxima en el módulo de elasticidad se observó para las mezclas que contenían 100% de RA [52].

Los módulos de elasticidad de diferentes mezclas de concreto fueron medidas a los 91 días y se muestra en la Figura 9. Debido al reemplazo completo de los agregados naturales (NA) por agregados reciclados (RA), el módulo de elasticidad de la mezcla M2 se redujo significativamente en comparación con la mezcla M1C (Mezcla de concreto con 100% de NA). La inclusión de 10% humo de sílice (SF) como reemplazo parcial del cemento portland ordinario (OPC) en la tercera mezcla (M3) mejora ligeramente el valor del módulo elástico en comparación con M2. Sin embargo, cuando se utiliza Cenizas volantes (FA) como un 30% de reemplazo parcial del cemento en la cuarta mezcla (M4), el módulo de elasticidad se reduce en comparación con M3, y se cree que esto se debe a la lenta reacción puzolánica que podría haber causado una mayor porosidad en este concreto que en el de concreto M3. El uso de 50% de RA como reemplazo parcial del NA en las mezclas M5 y M6 mejoró significativamente el módulo de elasticidad de M3 y M4 [58].

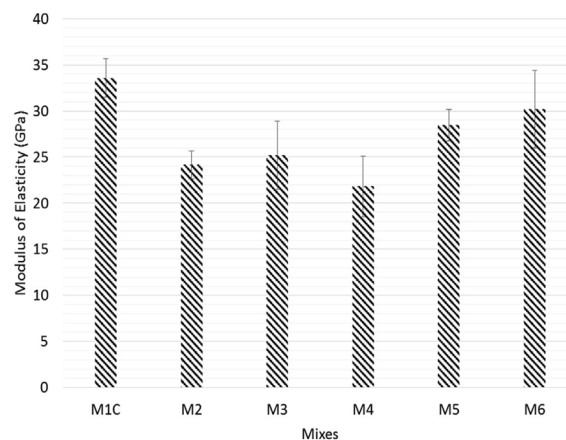


Figura 9. Valores del módulo de elasticidad medidos de las mezclas de concreto.
Fuente: Ahmed et al. (2019) [58].

La incorporación de agregados gruesos reciclados (CRA) o agregados finos reciclados (FRA) disminuyen el módulo de elasticidad (E_c) de 28 días de los concretos resultantes. En particular, una incorporación completa de CRA disminuye el módulo de elasticidad entre un 18,9% y un 23,6%, y un reemplazo del 100% de arena natural con FRA reduce el E_c del concreto entre un 2,1% y un 16,0%. Cuando se comparó la influencia de FRA en la E_c de 28 días con el valor correspondiente de CRA, la FRA tuvo una influencia menos significativa en la E_c de la RAC resultante que la CRA. En la figura 10. Se evidencia el efecto de los porcentajes de FRA sobre la E_c de los RAC en diferentes proporciones de reemplazo de CRA. Se emplearon

FRA obtenidos de losas de concreto triturado (FRA-11.2) Y FRA obtenido del hormigón de un experimento terminado en el laboratorio (FRA-8.1). La incorporación de 100% FRA disminuyó el E_c en un 5,6–13,5%, mientras que el E_c del CRA con 50% de reemplazo del agregado se redujo en un 6,8–16,0%. Esto puede indicar que las influencias de CRA y FRA son independientes entre sí, por lo que pueden investigarse de forma independiente [59].

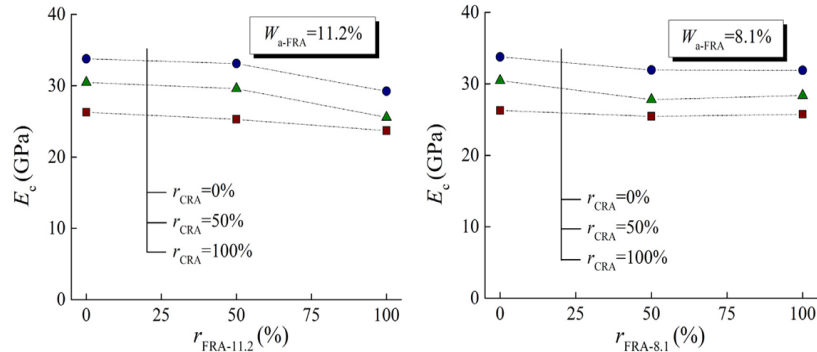


Figura 10. La influencia de la relación de reemplazo de FRA en el módulo elástico de RAC en diferentes relaciones de reemplazo de CRA.
Fuente: Wang et al. (2019) [59].

Finalmente, en los últimos años diversos estudios han demostrado que el RAC puede mantener las propiedades del concreto y además que el RA puede sustituir parcialmente al NA, lo cual contribuye para disminuir la extracción de NA evitando la sobreexplotación de los recursos naturales y disminuyendo la contaminación ambiental debido a que se puede utilizar los RA obtenidos de los restos que dejan las demoliciones. Por otro lado, las obtenciones de los RA tienen un menor costo en comparación a los NA, esto genera que el RAC sea más económico que un concreto convencional. El reemplazo del 50% de NA por RA origina una mezcla menos costosa, pero prácticamente con la misma calidad y resistencia que el concreto tradicional.

Conclusiones

Con base en el análisis e interpretación de resultados de los artículos seleccionados, se puede deducir lo siguiente:

Los residuos de las demoliciones de estructuras pueden reutilizarse y ser incorporados como agregados para la elaboración de un concreto RAC, esto contribuye con la reducción de los desechos de construcción.

La resistencia a la compresión del concreto endurecido reduce debido al incremento de la sustitución de los agregados naturales (NA) por agregados reciclados (RA), tanto las propiedades mecánicas como las de durabilidad se ven afectadas negativamente por el aumento de la sustitución del agregado natural, generalmente el concreto con RCA tiene un menor rendimiento que el concreto con NA.

El reemplazo de los agregados naturales con hasta un 25% de RCA no altera las propiedades de resistencia del concreto de manera notable, pero cuando el reemplazo de los agregados es mayor al 25%, los módulos de elasticidad y la resistencia del RAC se ven afectados.

En el proceso de reciclaje de RCA, un método de tratamiento simple es capaz de reducir el mortero adherido a un nivel tal que disminuyan los efectos negativos y crear un RAC de mejor calidad que sea competitivo con el hormigón normal. Los agregados reciclados que son tratados (RCA-T) pueden alcanzar o incluso superar las propiedades de los agregados naturales. Las propiedades del RAC mejoran debido al proceso de recolección y el tipo de trituración del AR, la calidad del AR tiene un acercamiento progresivo a la calidad del NA.

La reducción de la resistencia a la tracción, así como la flexión del RAC con el aumento del porcentaje de RA es menor que la disminución de la resistencia a la compresión y en los módulos de elasticidad.

El RCA tiene mayores valores de absorción del agua, menor densidad y mayores valores de solidez. La durabilidad del RAC se ve afectada por la gran cantidad de absorción de agua del RCA y la presencia de mortero poroso que se adhiere a la superficie. La durabilidad del concreto con RCA mejora con el incremento del contenido de cemento en la mezcla, esto se debe a su mayor densidad y a la mejora de la calidad de la pasta de cemento hidratada.

La trabajabilidad del RAC es afectada por la porosidad y el contenido de RCA, esta propiedad disminuye con el aumento de la porosidad y el reemplazo del RCA, debido al menor uso de cemento y a la forma y naturaleza de las partículas ásperas e irregulares del RCA.

Los RAC reducen la extracción de NA lo cual evita la sobreexplotación de los recursos naturales y disminuye la contaminación ambiental debido a la reutilización de los restos y desperdicios que dejan las demoliciones o construcciones de diversas obras; además es preciso indicar que los RA tienen un menor precio que los NA, lo que da como resultado un concreto más económico, el reemplazo del 50% de los agregados naturales con RCA produce una mezcla menos costosa, pero prácticamente con la misma calidad.

Referencias

- [1] M. Nedeljković, J. Visser, B. Šavija, S. Valcke y E. Schlangen, «Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review,» *Journal of Building Engineering*, vol. 38, p. 102196, 2021. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000528?via%3Dihub>.
- [2] B. Hamad, A. Dawi, A. Daouy G. Chehab, «Studies of the effect of recycled aggregates on flexural, shear, and bond splitting beam structural behavior,» *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, p. e00186, 2018 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509518301815?via%3Dihub>
- [3] A. Elansary, M. Ashmawy y H. Abdalla, «Effect of recycled coarse aggregate on physical and mechanical properties of concrete,» *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, n° 3, pp. 583-595, 2020 Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1369433220963792>.
- [4] S. Ramdani, A. Guettala, M. L. Benmalek y J. Aguiar, «Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder,» *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 302-311, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710218307174?via%3Dihub>.

- [5] M. Abed y R. Nemes, «Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials,» *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 350-361, 2019 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819308487?via%3Dihub>.
- [6] K. Pin Verian, W. Ashraf y. Cao, «Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 133, pp. 30-49, 2018 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918300430?via%3Dihub> .
- [7] H. Sasanipour y F. Aslani, «Durability assessment of concrete containing surface pretreated coarse recycled concrete aggregates,» *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120203, 2020 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182032208X?via%3Dihub> .
- [8] S. Medjigbodo, A. Bendimerad, E. Rozière y A. Loukili, «How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties?,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 72-86, 2018 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946517306455?via%3Dihub>.
- [9] S. M. Saleem Kazmi, M. Junaid Munir, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Y. Zhou y F. Xing, «Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation,» *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120284, 2020 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820322893?via%3Dihub> .
- [10] V. Revilla Cuesta, V. Ortega López, M. Skaf y J. M. Manso, «Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 263, p. 120671, 2020 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820326763?via%3Dihub>.
- [11] Q. LIU, J. XIAO, C. S. POON y L. LI, «Investigation on modeled recycled concrete prepared with recycled concrete aggregate and recycled brick aggregate,» *Journal of Building Structures*, vol. 41, n° 12, pp. 133-140, 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/11/2149> .
- [12] S. M. Saleem Kazmi, M. Junaid Munir, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Y. Zhou y F. Xing, «Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, pp. 1-32, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946519304226?via%3Dihub>.
- [13] K. Kapoor, S. P. Singh y B. Singh, «Evaluating the durability properties of self compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates,» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 24, n° 14, pp. 2383-2399, 2018. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2018.1506825?journalCode=tece20>.
- [14] B. Cantero, M. Bravo, J. De Brito, I. Sáez del Bosque y C. Medina, «Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122913, 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620329589?via%3Dihub>.

- [15] A. Gholampour y T. Ozbakkaloglu, «Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates,» *Engineering Structures*, vol. 157, pp. 224-234, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029617331267?via%3Dihub>.
- [16] D. Singh y S. P. Singh, «Influence of recycled concrete aggregates and blended cements on the mechanical properties of pervious concrete,» *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 5, n° 66, pp. 1-12, 2020. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-020-00314-x>.
- [17] H. Ahmed, M. Tiznobaik, S. Huda, M. S. Islam y M. S. Alam, «Recycled aggregate concrete from large-scale production to sustainable field application,» *Construction and Building Materials*, vol. 262, p. 119979, 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182031984X?via%3Dihub>.
- [18] P. Zhu, Y. Hao, H. Liu, X. Wang y L. Gu, «Durability evaluation of recycled aggregate concrete in a complex environment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 122569, 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620326160?via%3Dihub>.
- [19] B. Singh Saini y S. P. Singh, «Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements,» *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120233, 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820322388?via%3Dihub>.
- [20] G. Dimitriou, P. Savva y M. Petrou, «Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 158, pp. 228-235, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817319633?via%3Dihub>.
- [21] A. Adessina, A. B. Fraj, J.-F. Barthélémy, C. Chateau y D. Garnier, «Experimental and micromechanical investigation on the mechanical and durability properties of recycled aggregates concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 126, p. 105900, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884619307811?via%3Dihub>.
- [22] B. Liu, C. Feng y Z. Deng, «Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 217, pp. 557-572, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819312449?via%3Dihub>.
- [23] Y. Chen, Z. Chen, J. Xu, E. M. Lui y B. Wu, «Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression,» *Construction and Building Materials*, vol. 229, p. 116935, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819323773?via%3Dihub>.
- [24] J. Xiao, K. Zhang y A. Akbarnezhad, «Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 181, pp. 753-771, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618302786?via%3Dihub>.

- [25] H. Salahuddin, A. Nawaz, A. Maqsoom, T. Mehmood y B. u. A. Zeeshan, «Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 202, pp. 415-425, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181930011X?via%3Dihub> .
- [26] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu y L. Li, «Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate,» *Results in Physics*, vol. 9, pp. 1317-1322, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379718308283?via%3Dihub>.
- [27] G. Duarte, M. Bravo, J. de Brito y J. Nobre, «Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 696-708, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819306476?via%3Dihub>.
- [28] J. Pacheco, J. de Brito, C. Chastre y L. Evangelista, «Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates,» *Construction and Building Materials*, vol. 201, pp. 110-120, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818331945?via%3Dihub>.
- [29] F. Kazemian, H. Rooholamini y A. Hassani, «Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates,» *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 690-700, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819306701?via%3Dihub>.
- [30] M. Velay Lizancos, I. Martinez Lage, M. Azenha, J. Granja y P. Vazquez Burgo, «Concrete with fine and coarse recycled aggregates: E-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages,» *Construction and Building Materials*, vol. 193, pp. 323-331, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818326266?via%3Dihub>.
- [31] S. M. Saleem Kazmi, M. Junaid Munir, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Y. Zhou y F. Xing, «Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, p. 103398, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946519304226?via%3Dihub>.
- [32] Y. Zhang, W. Luo, J. Wang, Y. Wang, Y. Xu y J. Xiao, «A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 115-125, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819305604?via%3Dihub>.
- [33] O. Larsen, V. Naruts y O. Aleksandrova, «Self-compacting concrete with recycled aggregates,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, nº 5, pp. 2023-2026, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319321558?via%3Dihub> .
- [34] Y. Benarchid, Y. Taha, R. Argane, A. Tagnit-Hamou y M. Benzaazoua, «Concrete containing low-sulphide waste rocks as fine and coarse aggregates: Preliminary assessment of materials,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 221, pp. 419-429, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/>

article/abs/pii/S0959652619306328?via%3Dihub.

- [35] S. Santos, P. R. da Silva y J. de Brito, «Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review,» *Journal of Building Engineering*, vol. 22, pp. 349-371, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710218305217?via%3Dihub>.
- [36] J. Sainz-Aja, I. Carrascal, J. Polanco, C. Thomas, I. Sosa, J. Casado y S. Diego, «Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 945-955, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619314878?via%3Dihub>.
- [37] W. Chen, R. Jin, Y. Xu, D. Wanatowski, B. Li, L. Yan, Z. Pan y. Yang, «Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature,» *Construction and Building Materials*, vol. 218, pp. 483-496, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819312991?via%3Dihub>.
- [38] C. Liu, J. Fan, G. Bai, Z. Quan, G. Fu, C. Zhu y Z. Fan, «Cyclic load tests and seismic performance of recycled aggregate concrete (RAC) columns,» *Construction and Building Materials*, vol. 195, pp. 682-694, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181832484X?via%3Dihub>.
- [39] H. He, C. S. Sandeep y K. Senetakis, «The interface behavior of recycled concrete aggregate: A micromechanical grain-scale experimental study,» *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 627-638, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819305884?via%3Dihub>.
- [40] P. Rajhans, G. Chand, N. Kisku, S. K. Panda y S. Nayak, «Proposed mix design method for producing sustainable self compacting heat cured recycled aggregate concrete and its microstructural investigation,» *Construction and Building Materials*, vol. 218, pp. 568-581, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819313285?via%3Dihub>.
- [41] I. Marie y R. Mujalli, «Effect of design properties of parent concrete on the morphological properties of recycled concrete aggregates,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, n° 1, pp. 334-345, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098617315975?via%3Dihub>.
- [42] M. Leite y V. Santana, «Evaluation of an experimental mix proportion study and production of concrete using fine recycled aggregate,» *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 243-253, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710218306946?via%3Dihub>.
- [43] R. Muduli y B. Bhusan Mukharjee, «Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 398-414, 2019, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618332475?via%3Dihub>.
- [44] H. El-Hassan, P. Kianmehr y S. Zouaoui, «Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete

aggregates and slag,» *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 164-175, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819308281?via%3Dihub>.

- [45] N. Singh y S. P. Singh, «Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques,» *Construction and Building Materials*, vol. 181, pp. 73-84, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818314296?via%3Dihub>.
- [46] T. Alexandru, B. Marinela, D. Laura y B. Irina, «Mechanical and Environmental Performances of Concrete Using Recycled Materials,» *Procedia Manufacturing*, vol. 32, pp. 253-258, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197891930246X?via%3Dihub>.
- [47] H. Dilbas, Ö. Çakır y C. D. Atiş, «Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method,» *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 716-726, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819308517>.
- [48] C. Santana Rangel, R. D. Toledo Filho, M. Amario, M. Pepe, G. de Castro Polisseni y G. Puente de Andrade, «Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 589-601, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261833124X?via%3Dihub>.
- [49] P. Zhu, Y. Hao, H. Liu, D. Wei, S. Liu y L. Gu, «Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 442-450, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819306920?via%3Dihub>.
- [50] M. Kazemi, R. Madandoust y J. de Brito, «Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing,» *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp. 630-638, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819317842?via%3Dihub>.
- [51] H. Zhang y Y. Zhao, «Cracking of reinforced recycled aggregate concrete beams subjected to loads and steel corrosion,» *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 364-379, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819306543?via%3Dihub>.
- [52] J. Thomas, N. Nazeer Thaickavil y P. Wilson, «Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates,» *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 349-365, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710218302511?via%3Dihub>.
- [53] V. Abreu, L. Evangelista y J. de Brito, «The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 188, pp. 480-489, 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818318506?via%3Dihub>.
- [54] T. Uddin Mohammed, K. Hossain Shikdar y M. A. Awal, «Shear strength of RC beam made with

- recycled brick aggregate,» *Engineering Structures*, vol. 189, pp. 497-508, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014102961834166X?via%3Dihub>.
- [55] T. Li, J. Xiao, Y. Zhang y B. Chen, «Fracture behavior of recycled aggregate concrete under three-point bending,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, pp. 1-11, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262202488X#!>.
- [56] J. Guo, J. Cai, Q. Chen, X. Liu, Y. Wang y Z. Zuo, «Dynamic behaviour and energy dissipation of reinforced recycled aggregate concrete beams under impact,» *Construction and Building Materials*, vol. 214, pp. 143-157, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819310037?via%3Dihub>.
- [57] M. Behera, A. K. Minocha y S. K. Bhattacharyya, «Flow behavior, microstructure, strength and shrinkage properties of self-compacting concrete incorporating recycled fine aggregate,» *Construction and Building Materials*, vol. 228, pp. 1-16, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819322494?via%3Dihub>.
- [58] F. Ahmed Shaikh, P. Nath, A. Hosan, M. John y W. K. Biswas, «Sustainability assessment of recycled aggregates concrete mixes containing industrial by-products,» *Materials Today Sustainability*, vol. 5, pp. 1-13, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589234719300144?via%3Dihub>.
- [59] Y. Wang, H. Zhang, Y. Geng, Q. Wang y S. Zhang, «Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate,» *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 332-346, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819311031?via%3Dihub>.