

Design of Sustainable Self-Compacting Concrete and its Influence on Mechanical Behavior with Recycled Aggregates

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarria Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor³; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)⁴; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister⁵; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁶; David Minaya Huerta, Doctor⁷

^{1,2,4,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe, ^{3,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, kpazoss@unasam.edu.pe, dminayah@unasam.edu.pe

Abstract. - This research focused on analyzing the use of recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW) to improve the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). Natural aggregates were replaced by CDW in proportions ranging from 25% to 100% by weight. Methodologically, a documentary, descriptive, and retrospective approach was utilized, based on international articles. The main results indicate that the slump flow of SCC varied between 560 mm and 685 mm, and the filling capacity between 0.82 and 0.94, meeting SCC requirements. Regarding mechanical properties, the compressive strength of concrete with recycled aggregate (RA) ranged from 25 MPa to 65 MPa. The indirect tensile strength varied from 2.65 MPa to 4.35 MPa, and the flexural strength fluctuated between 5.61 MPa and 6.52 MPa, with a peak of 6.52 MPa at 25% CDW. These findings highlight the potential of CDW for sustainable concrete manufacturing, contributing to waste reduction and natural resource conservation, thereby minimizing environmental impact. Samples included supplementary cementitious materials and superplasticizers to optimize performance. This work demonstrates the viability of SCC with CDW as an ecological and efficient construction solution for civil engineering.

Keywords. - Self-compacting concrete, recycled aggregate, sustainability, construction waste, mechanical properties.

Diseño de Hormigón Autocompactante Sostenible y su Influencia en el Comportamiento Mecánico con Áridos Reciclados

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarria Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Távara Rodríguez, Doctor³; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)⁴; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister⁵; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁶; David Minaya Huerta, Doctor⁷

^{1,2,4,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe, ^{3,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, kpazoss@unasam.edu.pe, dminayah@unasam.edu.pe

Resumen - Esta investigación se centró en analizar el uso de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante (HAC). Los áridos naturales fueron sustituidos por RCD en proporciones que oscilaron entre el 25% y el 100% en peso. Metodológicamente se utilizó un enfoque documental, descriptivo y retrospectivo, a partir de artículos internacionales. Los principales resultados indican que el caudal de asentamiento de HAC varió entre 560 mm y 685 mm, y la capacidad de llenado entre 0,82 y 0,94, cumpliendo con los requisitos de HAC. En cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión del hormigón con árido reciclado (RA) osciló entre 25 MPa y 65 MPa. La resistencia a la tracción indirecta varió de 2,65 MPa a 4,35 MPa, y la resistencia a la flexión fluctuó entre 5,61 MPa y 6,52 MPa, con un pico de 6,52 MPa al 25% de RCD. Estos hallazgos ponen de manifiesto el potencial de los RCD para la fabricación sostenible de hormigón, contribuyendo a la reducción de residuos y a la conservación de los recursos naturales, minimizando así el impacto medioambiental. Las muestras incluían materiales cementosos suplementarios y superplastificantes para optimizar el rendimiento. Este trabajo demuestra la viabilidad de HAC con RCD como solución constructiva ecológica y eficiente para la ingeniería civil.

Palabras clave: Hormigón autocompactante, árido reciclado, sostenibilidad, residuos de construcción, propiedades mecánicas.

I. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción a nivel global se enfrenta a un doble desafío: la creciente demanda de materiales y la gestión de ingentes volúmenes de residuos. Este sector es un consumidor de recursos naturales y, simultáneamente, uno de los principales generadores de desechos sólidos. La preocupación por el agotamiento de estos recursos y el impacto ambiental derivado de la acumulación de residuos es una constante en la agenda global [1]. A modo de ilustración, se estima que China produce anualmente más de 1.500 millones de toneladas de residuos de RCD, mientras que en Europa el sector de la construcción genera cerca de 820 millones de toneladas [2]. En Estados Unidos, según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), se generaron 493 millones de toneladas de estos residuos en 2015 [3]. En el contexto peruano, la producción de RCD también ha experimentado un aumento significativo, con un promedio de 11 millones de

toneladas anuales solo en Lima, donde la industria genera aproximadamente 19,000 toneladas diarias de desmonte [4].

La acumulación descontrolada de RCD puede desencadenar serios problemas ambientales, tales como la contaminación del suelo y del agua, la degradación de paisajes naturales y, por la descomposición de ciertos materiales en los vertederos, la liberación de gases de efecto invernadero. Estas consecuencias ambientales, sumadas a la creciente conciencia social sobre la necesidad de prácticas ecológicas, han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción de materiales de construcción.

Ante este panorama crítico, la reutilización de los RCD emerge como una estrategia fundamental para impulsar la sostenibilidad en el sector de la construcción. Estos residuos, que incluyen materiales como concreto, ladrillo, madera y acero, representan una valiosa fuente de agregados reciclados que, tras un adecuado procesamiento, pueden ser reincorporados en la elaboración de nuevos materiales de construcción. El aprovechamiento de estos residuos no solo disminuye la cantidad de desechos enviados a vertederos, sino que también reduce la extracción de agregados vírgenes, minimiza el consumo de energía en la producción de materiales y contribuye a la mitigación de las emisiones de CO₂. Este enfoque fomenta una economía circular, transformando los desechos en recursos valiosos y promoviendo la innovación y la investigación en el campo de los materiales avanzados.

En las últimas décadas, la viabilidad de incorporar RCD en el hormigón ha sido objeto de extensas investigaciones. El hormigón autocompactante (HAC), tiene un interés considerable debido a sus características reológicas que permiten su colocación sin necesidad de vibración mecánica, lo que lo hace ideal para estructuras complejas y densamente armadas. Esto no solo beneficia al contratista en términos de tiempo y costos al reducir el esfuerzo y la energía asociados a la compactación, sino que también garantiza una eliminación más eficiente de burbujas de aire y una mayor densidad en la masa final de hormigón.

Estudios previos han explorado la incorporación de agregado grueso reciclado (AGR) en hormigones autocompactantes (CAC), mostrando resultados prometedores, aunque con ciertas limitaciones. Se ha observado que la inclusión de AGR puede llevar a una reducción en el rendimiento inicial y final del hormigón, si bien la trabajabilidad general se mantiene adecuada [5]. La eliminación del mortero adherido de los AGR, transformándolos en agregados granulados de hormigón triturado (AGT), ha demostrado incrementar la durabilidad a compresión y reducir la permeabilidad del hormigón, incluso hasta en un 6% [5]. Otros trabajos han evaluado el uso de polvo reciclado (RP) y RCA como adición cementante y agregado grueso, respectivamente, observando propiedades adecuadas en su estado fresco; no obstante, las características mecánicas del HAC con RP y RCA tendieron a disminuir gradualmente a medida que se incrementaba su contenido [6].

La necesidad de determinar las dosificaciones óptimas y las propiedades resultantes que permitan la adopción generalizada del hormigón con RCD en la industria de la construcción de viviendas, garantizando su desempeño técnico y su contribución a la sostenibilidad [7]. La viabilidad técnica de la sustitución de agregados naturales por RCD, es una contribución a la sostenibilidad y protección del medio ambiente en la industria de la construcción [8]. Estudios previos respaldan el efecto de los agregados reciclados sobre las propiedades reológicas del HAC [9], contribuyendo a la mayor rugosidad y absorción del RCD [10].

La incorporación de RCA en diversas mezclas de hormigón y las ventajas del HAC, presentan desafíos y lagunas significativas en el conocimiento. Por ejemplo, la rugosidad y mayor absorción del RCD pueden afectar las propiedades reológicas del HAC, impactando su fluidez y cohesión [10], aunque el uso de aditivos superplastificantes con una óptima dosificación contrarresta estas limitaciones [11].

La necesidad de optimizar las propiedades mecánicas y reológicas del HAC mediante la sustitución de agregados naturales por agregados reciclado, la aplicación específica en HAC presenta particularidades debido a su formulación altamente especializada que requiere un equilibrio entre fluidez, cohesión y estabilidad. La acumulación de RCD puede provocar serios problemas ambientales, como la contaminación del suelo y el agua, así como la liberación de gases de efecto invernadero. La construcción ha visto surgir diversos problemas en las últimas décadas, relacionados con la utilización de recursos y cómo afecta al medio ambiente, incluyendo el uso de recursos energéticos y naturales, la liberación de sustancias gaseosas nocivas (CO_2) y la generación de residuos [1].

La falta de una comprensión de las diferentes proporciones de RCD, y la interacción con aditivos, afectan el rendimiento del HAC, constituye una limitación para su adopción a gran escala en proyectos de construcción sostenibles. La viabilidad técnica y la aceptación en la industria dependen directamente de la disponibilidad de datos que confirmen que el HAC con RCD puede cumplir con los estándares de rendimiento requeridos para diversas

aplicaciones estructurales. El reciclaje de RCD se plantea como una opción para disminuir el impacto ambiental adverso que genera la industria en los rellenos sanitarios [1].

El objetivo principal del presente artículo fue analizar el efecto de la sustitución de agregados naturales por agregados reciclados de residuos de RCD en las propiedades mecánicas y reológicas del HAC. Se buscó obtener el porcentaje óptimo de agregado reciclado de RCD para mejorar el flujo libre, la capacidad de llenado y las propiedades mecánicas del HAC, utilizando aditivos superplastificantes para contrarrestar las limitaciones, hecho también corroborado por [11], reafirmando la importancia de una dosificación precisa para preservar la cohesión y fluidez del sistema cementante.

Desde una perspectiva ambiental, la reutilización de RCD permite reducir significativamente la extracción de áridos vírgenes y minimizar la disposición en vertederos, contribuyendo a una economía circular en la construcción [12]. Este impacto ambiental positivo puede cuantificarse mediante análisis de ciclo de vida, que revelan una disminución en la huella de carbono del hormigón con RCD. A nivel tecnológico, se abren oportunidades para diseñar productos más sostenibles e innovadores, así como para promover normativas que incentiven el uso de materiales reciclados, como también se ha señalado en investigaciones recientes [13]. Los resultados obtenidos evidencian que el uso RCD como sustituto parcial en mezclas de HAC ofrece un desempeño técnico viable, particularmente en términos de trabajabilidad y resistencia mecánica dentro de márgenes aceptables. La estabilidad reológica de las mezclas con valores de asentamiento y fluidez dentro de los rangos recomendados por EFNARC [14] sugiere que, incluso con contenidos de hasta 50% de RCD, es posible garantizar una adecuada colocación del concreto sin comprometer la calidad del vaciado. Los datos empíricos que facilitarán la adopción del HAC con RCD en proyectos de construcción, impulsan prácticas más ecológicas y resilientes en el sector de la ingeniería civil, que permitirán determinar el uso de este hormigón para la construcción de viviendas, considerando su impacto en las propiedades del material.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en el presente estudio fue de tipo mixto, predominantemente cuantitativa, complementada con un análisis cualitativo basado en la revisión documental. La investigación se fundamentó en una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2000 y 2025. Los criterios de inclusión se centraron en estudios que analizaran las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión) y reológicas (flujo de asentamiento, capacidad de llenado y de paso) del HAC con RCD, especificando las proporciones de sustitución de agregados naturales por RCD y el origen de los RCD. Se excluyen aquellos estudios sin información explícita sobre las proporciones de sustitución o que usaran agregados reciclados de fuentes distintas a la construcción y demolición.

La muestra de datos consistió en los resultados de los artículos seleccionados, enfocándose en proporciones de

sustitución de RCD del 0%, 25%, 50%, 75% y 100% en peso. Se analizaron detalladamente las propiedades de los materiales constituyentes de las mezclas, incluyendo el tipo y dosificación del cemento, los aditivos (superplastificantes y materiales cementantes suplementarios) y las propiedades de los agregados reciclados (origen, densidad, absorción de agua y granulometría).

El procesamiento de datos implicó la extracción sistemática de información, como parámetros de dosificación, resultados de pruebas de trabajabilidad del HAC (cono de Abrams modificado, caja L, embudo V) y resultados de pruebas de propiedades mecánicas del hormigón endurecido, como la resistencia a la compresión [15], resistencia a la tracción [16] y resistencia a la flexión [17]. Esta información se organizó en tablas y figuras para facilitar el análisis. El análisis de datos se llevó a cabo mediante una síntesis descriptiva y comparativa de los resultados, identificando patrones consistentes en el comportamiento del HAC con diferentes porcentajes de agregados reciclados. Este enfoque permitió evaluar el impacto de los RCD, establecer relaciones causa-efecto y determinar su viabilidad técnica. Enfatizamos los beneficios en sostenibilidad, como la reducción de la demanda de agregados vírgenes y la disminución de residuos, lo que minimiza el impacto ambiental de la construcción. Es importante destacar que se realizaron pruebas de laboratorio directas; solo se interpretan los datos existentes en la literatura.

Finalmente, la investigación se fundamentó en el marco normativo peruano vigente, incluyendo la Norma Técnica de Edificaciones E.060 "Concreto Armado" (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009) [18], NTP 400.037 "Agregados para concreto, Requisitos" (SENCICO, 2019) [19], NTP 400.050 "Manejo de Residuos de la Construcción y Demolición" (SENCICO, 2017) [20], y el Decreto Supremo N° 002-2022-VIVIENDA (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2022) [21]. La aplicación de estas normativas aseguró la pertinencia de nuestras conclusiones para el contexto de la construcción en Perú, conforme a las recomendaciones de EFNARC [22], manteniendo una relación a/c constante de 0,4.

III. RESULTADOS

Análisis del porcentaje de agregado reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) para mejorar la capacidad de llenado del hormigón autocompactable (HAC)

El estudio analizó cómo el porcentaje de agregado grueso reciclado (RCD), proveniente de residuos de construcción y demolición, afecta la capacidad de llenado del HAC. El estudio se centra en los resultados del ensayo de embudo en V, una prueba para evaluar la fluidez y el tiempo de flujo del HAC, además de verificar su cumplimiento con estándares internacionales. En la Figura 1, se muestra los resultados de tres autores que realizaron ensayos con diferentes porcentajes de RCD (0%, 25%, 50%, 75% y 100%). Este ensayo mide la capacidad de la mezcla para pasar a través de una abertura estrecha, lo cual indica su cohesión y la ausencia de segregación, propiedades vitales para la colocación del hormigón sin necesidad de vibración. Los datos, provenientes

de diversas fuentes [23, 24, 25], revelaron patrones de comportamiento del flujo del HAC.

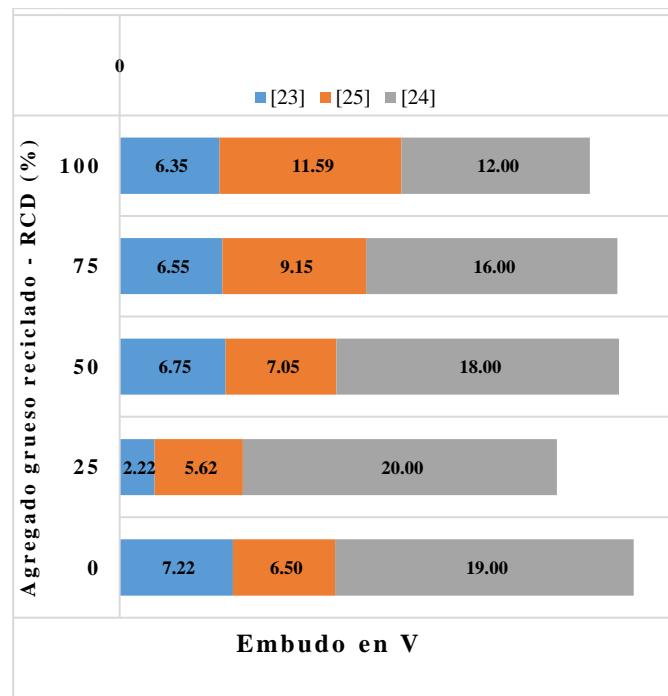


Fig. 1 Ensayo embudo en V Vs Porcentaje de agregado grueso reciclado (RCD).

La Figura 1 ilustra los resultados del ensayo de embudo en V para hormigones con distintos porcentajes de agregado grueso reciclado (RCD), agrupados por las referencias [23, 25] y [24]. Se observa una variabilidad notable en los tiempos de flujo a medida que aumenta el RCD. Por ejemplo, con 0% de RCD, los tiempos varían entre 6.50 s [25] y 19.00 s [24]; al 100% de RCD, fluctúan entre 6.35 s [23] y 12.00 s [24].

Esta dispersión indica que el RCD influye significativamente en la fluidez del HAC. Es crucial optimizar la cantidad de RCD para equilibrar las propiedades mecánicas y la trabajabilidad, esencial para un rendimiento óptimo y una construcción sostenible. Estas variaciones resaltan la necesidad de una caracterización exhaustiva del RCD y la optimización de dosificaciones para cada aplicación, garantizando una trabajabilidad adecuada sin comprometer otras propiedades. El análisis comparativo de la Figura 1 subraya la compleja relación entre el contenido de RCD y la trabajabilidad, enfatizando la influencia de los parámetros experimentales.

Analizar el porcentaje de agregado reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) para mejorar la capacidad de paso del hormigón autocompactable (HAC)

La Figura 2 presenta los resultados de los ensayos de caja en L realizados por tres autores, analizando el comportamiento del HAC con distintos porcentajes (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) de agregado grueso reciclado (RCD). Este ensayo es fundamental para evaluar la trabajabilidad del HAC y asegurar que cumpla con los estándares internacionales. La trabajabilidad es una propiedad crucial, ya que impacta

directamente en la colocación, compactación y acabado, incidiendo en la calidad final de la estructura.

El ensayo de caja en L mide la capacidad del hormigón para fluir y llenar un encofrado sin segregación. Los valores mostrados corresponden a diferentes porcentajes de sustitución de agregado grueso natural por RCD, con datos de diversas fuentes [23, 24, 25, 26]. Este ensayo, al medir el flujo a través de obstáculos, es un indicador clave de la cohesión y resistencia a la segregación. Un valor cercano a 1.0 indica excelente capacidad de llenado y mínima segregación.

La Figura 2 ilustra la relación entre el ensayo de caja en L y distintos porcentajes de agregado grueso reciclado (RCD). Los datos, extraídos de referencias como [23, 24, 25, 26], muestran variaciones en la trabajabilidad del HAC a medida que aumenta el RCD. Por ejemplo, la referencia [23] reporta un valor de 0.84 sin RCD, incrementándose a 0.87 con 100% de RCD. En contraste, la referencia [25] muestra un descenso de 0.92 sin RCD a 0.82 con 100% de RCD. Estas diferencias subrayan la influencia del RCD en la fluidez del hormigón.

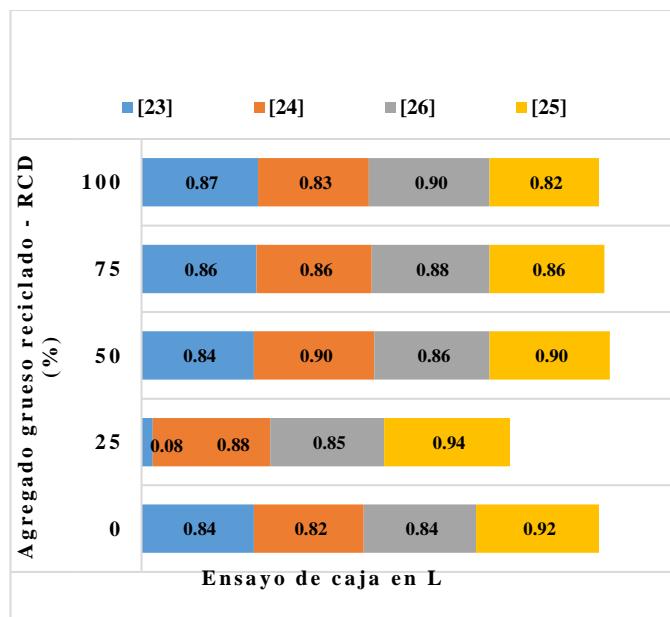


Fig. 2 Ensayo de caja en L vs Porcentaje de agregado grueso reciclado (RCD).

Optimizar la dosificación de RCD es necesario para mantener una trabajabilidad adecuada sin comprometer la calidad, lo que es importante para el diseño de mezclas sostenibles y el aprovechamiento de residuos. Los resultados sugieren que, con una caracterización y dosificación apropiadas, el HAC con RCD puede alcanzar propiedades de fluidez y estabilidad comparables a las del hormigón convencional, apoyando objetivos de sostenibilidad y eficiencia de recursos. En resumen, la prueba de caja en L indica que el RCD puede incorporarse exitosamente sin afectar gravemente las características de flujo, un requisito clave para aplicaciones autocompactantes.

Analizar el porcentaje de agregado reciclado de residuos de RCD para incrementar la resistencia a la compresión del hormigón autocompactante (HAC)

La Figura 3 ilustra los resultados de ensayos de resistencia a la compresión axial a los 28 días de curado en HAC con diferentes porcentajes (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) de agregado grueso reciclado (RCD). Este análisis evalúa cómo el RCD afecta a las propiedades mecánicas, la capacidad de carga y durabilidad del hormigón. Los datos, aportados por diversas fuentes [24, 25, 27, 28], permiten una visión comparativa del impacto del RCD en esta propiedad para el diseño y la seguridad en ingeniería civil, verificando el cumplimiento con normativas nacionales e internacionales.

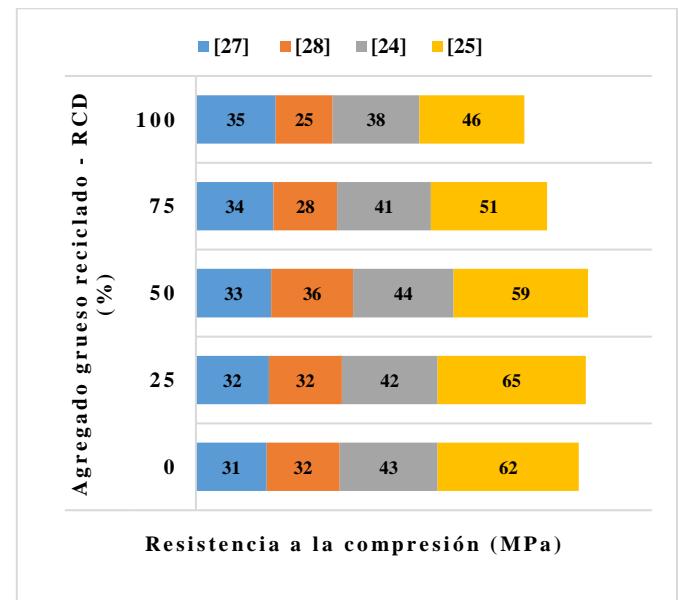


Fig. 3 Resistencia a la compresión vs Porcentaje de agregado grueso reciclado (RCD)

La Figura 3 muestra la resistencia a la compresión (MPa) del hormigón con diferentes porcentajes de agregado grueso reciclado (RCD), con datos de las referencias [24, 25, 27, 28]. Se observa una marcada variabilidad en la resistencia con la adición de RCD. Por ejemplo, sin RCD, la resistencia es de 31 MPa para [27] y 62 MPa para [25]. Con 100% RCD, [27] reporta un aumento a 35 MPa, mientras [25] disminuye a 46 MPa.

Esta fluctuación sugiere que el impacto del RCD en la resistencia a la compresión depende de múltiples factores específicos de cada mezcla. Es importante optimizar la dosificación del RCD para asegurar un rendimiento estructural adecuado y promover la sostenibilidad. Las diferencias entre estudios enfatizan la importancia de la calidad del RCD y la dosificación de la mezcla. Para el diseño de hormigón en viviendas, la incorporación de RCD ofrece beneficios sostenibles, pero se debe optimizar el porcentaje de reemplazo y las proporciones para cumplir con los requisitos estructurales y de durabilidad, garantizando seguridad y vida útil. En resumen, el efecto del RCD no es uniforme, lo que resalta la necesidad de una caracterización y optimización rigurosas del diseño de la mezcla.

Analizar el porcentaje de agregado reciclado de residuos de RCD para incrementar la resistencia a la tracción indirecta del hormigón autocompactante (HAC)

La Figura 3 revela la resistencia a la compresión del hormigón con agregado grueso reciclado (RCD), mostrando una variabilidad significativa entre estudios [24, 25, 27, 28]. Por ejemplo, la resistencia a 0% RCD varía de 31 MPa [27] a 62 MPa [25], y a 100% RCD, de 35 MPa [27] a 46 MPa [25].

Esta fluctuación subraya que el efecto del RCD depende de la mezcla. Es necesario optimizar la dosificación del RCD y la calidad del material para asegurar el rendimiento estructural y la durabilidad, promoviendo así la sostenibilidad en la construcción de viviendas. La no uniformidad del RCD exige una caracterización y optimización rigurosas del diseño de la mezcla.

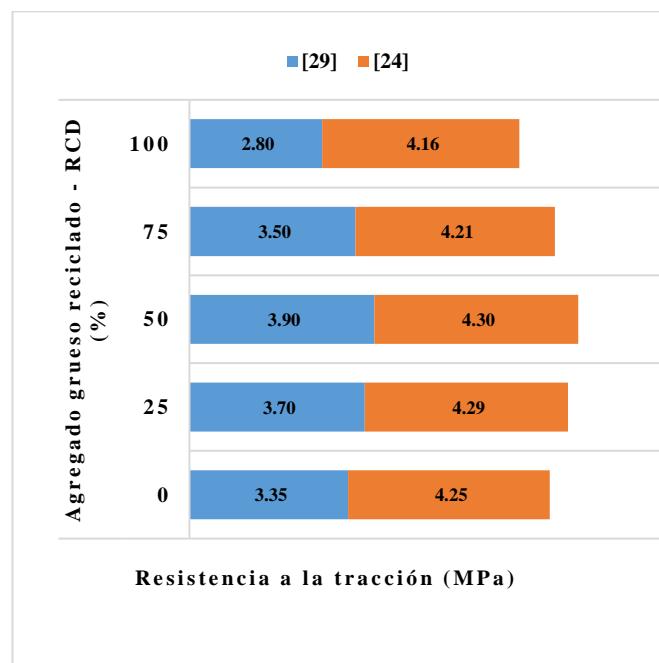


Fig. 4 Resistencia a la tracción vs Porcentaje de agregado grueso reciclado (RCD)

La Figura 4 presenta la resistencia a la tracción (MPa) del hormigón con diferentes porcentajes de agregado grueso reciclado (RCD), utilizando datos de las referencias [24, 29]. Se observa una variabilidad en los resultados: con 0% RCD, la resistencia es de 3.35 MPa para [29] y 4.25 MPa para [24]. Al 100% RCD, los valores cambian a 2.80 MPa para [29] y 4.16 MPa para [24]. Esta fluctuación indica que el RCD influye en la resistencia a la tracción, lo que exige una optimización cuidadosa para mantener la integridad estructural y promover la sostenibilidad en la construcción.

La implicación de estos hallazgos es necesario para el diseño de elementos donde la resistencia a la tracción es determinante, como en losas o muros sometidos a flexión. Aunque el RCD ofrece ventajas de sostenibilidad, es optimizar su dosificación y las propiedades de los materiales para asegurar que el hormigón con RCD mantenga un rendimiento estructural adecuado, especialmente en aplicaciones como

viviendas multifamiliares. El efecto del RCD en la resistencia a la tracción varía considerablemente entre estudios. Mientras [29] muestra una disminución con mayores porcentajes de RCD, [24] demuestra un rendimiento más estable. Esto enfatiza la importancia de una cuidadosa selección de materiales, caracterización exhaustiva del RCD y un diseño optimizado de la mezcla para lograr la resistencia a la tracción deseada en hormigones con agregados reciclados.

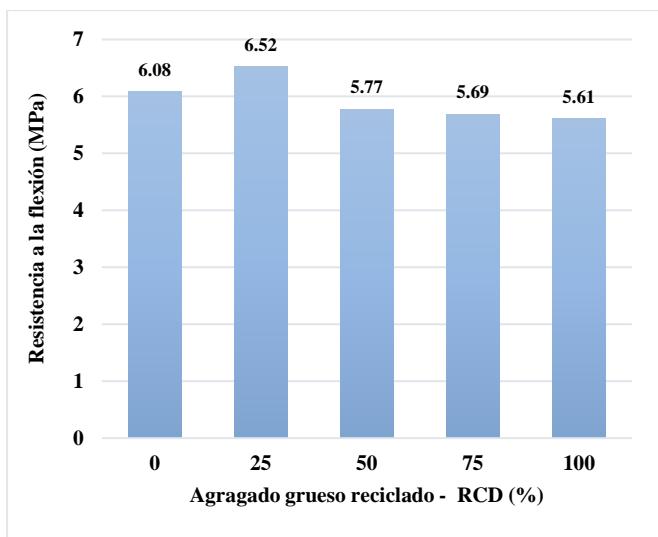
El presente estudio evaluó dieciséis mezclas de HAC, incluyendo una de control sin RCD, con porcentajes de sustitución del 0%, 25%, 50%, 75% y 100% en peso. El objetivo principal fue comprender el comportamiento mecánico del HAC con RCD para fomentar prácticas de construcción más sostenibles y reducir el impacto ambiental de los residuos de construcción y demolición (RCCD).

Analizar el porcentaje de agregado reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) para incrementar la resistencia a la flexión del hormigón autocompactante (HAC)

La Figura 5 presenta los resultados de los ensayos de resistencia a la flexión a los 28 días de curado [15], analizando el comportamiento del HAC con diferentes porcentajes (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) de agregado grueso reciclado (RCD). Esta figura evalúa cómo el RCD afecta esta propiedad mecánica. La resistencia a la flexión mide la capacidad del hormigón para resistir cargas que inducen flexión antes de la fractura, siendo un indicador para su tenacidad y comportamiento bajo cargas de servicio, y verificando su cumplimiento con estándares internacionales. La Figura 5 ilustra la resistencia a la flexión del hormigón con diferentes porcentajes de agregado grueso reciclado (RCD), según la referencia [15]. Se observa que, sin RCD, la resistencia es de 6.08 MPa. Con un 25% de RCD, la resistencia alcanza su punto máximo de 6.52 MPa. Sin embargo, al aumentar el RCD a 50%, 75% y 100%, la resistencia disminuye progresivamente a 5.77 MPa, 5.69 MPa y 5.61 MPa, respectivamente.

Esta tendencia sugiere la existencia de una dosificación óptima de RCD (aproximadamente 25%) para maximizar la resistencia a la flexión. La variación no lineal del efecto del RCD resalta la necesidad de un control preciso en la mezcla para aprovechar sus beneficios y promover la sostenibilidad en la construcción. Aunque un mayor porcentaje de RCD puede reducir gradualmente la resistencia, el hormigón con 100% RCD aún presenta una resistencia comparable a la del hormigón sin RCD. Esto subraya el potencial del RCD, con una optimización cuidadosa, para mantener propiedades mecánicas aceptables.

La Tabla 1 detalla los parámetros para el "Diseño de Mezcla con Agregado de Hormigón Reciclado (RCA)", un estudio centrado en incorporar RCA en mezclas de hormigón para promover la sostenibilidad. Se prepararon 12 mezclas, indicando un enfoque experimental integral.



Nota: Adaptado [15].

Fig. 5 Resistencia a la flexión Vs Porcentaje de agregado grueso reciclado (RCD)

El estudio consideró tanto RCA finos como gruesos para analizar su impacto en el hormigón, evaluando porcentajes de reemplazo de agregado natural del 25%, 50%, 75% y 100%. La organización de la serie de mezclas incluyó RCA gruesos, RCA finos y una combinación de ambos, lo que permite aislar los efectos de cada tipo de RCA.

TABLA 1
DATOS RELEVANTES DE DISEÑO DE MEZCLA CON AGREGADO DE HORMIGÓN RECICLADO (RCA)

Categoría / Parámetro	Descripción / Valor	Notas e implicaciones
Tema	Diseño de mezcla con agregado de hormigón reciclado (RCA)	Se centra en el diseño de mezclas de hormigón incorporando agregados de hormigón reciclado.
Número de mezclas preparadas	12	Indica un programa experimental integral.
Tipo de RCA utilizado	Finos y Gruesos (Fine and Coarse RCA)	Investiga el efecto de los agregados reciclados tanto finos como gruesos.
Porcentajes de reemplazo	25%, 50%, 75%, y 100%	Estos porcentajes se refieren a una mezcla de referencia, lo que indica el grado de reemplazo natural del agregado.
Organización de la serie Mix	1. RCA gruesos 2. RCA finos 3. Combinación RCA grueso y fino	Este enfoque estructurado permite aislar los efectos de diferentes tipos de RCA.
Pretratamiento de RCA	Remojados previamente (Pre-soaked)	Este método se consideró eficaz para la eliminación de impurezas y la obtención de RCA de mejor calidad. Este es un paso crucial para optimizar el rendimiento del RCA.
Aditivo utilizado	SP (Superplastificante)	Incorporado para lograr una trabajabilidad adecuada.
Rango de trabajabilidad objetivo	850 a 550 mm	Probablemente se refiere a un rango de prueba de flujo de asentamiento, que indica requisitos para hormigón autocompactable o hormigón altamente fluido.
Fuente de recomendación de trabajabilidad	EFNARC	Se refiere a la Federación Europea de Asociaciones Nacionales que Representan el Hormigón, un organismo reconocido que proporciona directrices para el hormigón autocompactable.

Un aspecto importante fue el pretratamiento del RCA mediante remojo previo, un método eficaz para eliminar impurezas y optimizar su rendimiento. Para lograr la trabajabilidad deseada, se utilizó un aditivo superplastificante (SP). El rango de trabajabilidad objetivo fue de 850 a 550 mm (probablemente una prueba de flujo de asentamiento), un requisito para hormigones autocompactable o altamente fluidos. La EFNARC, una federación europea reconocida en el ámbito del hormigón autocompactable fue la fuente de las recomendaciones de trabajabilidad, asegurando que el diseño de mezcla se ajustara a estándares internacionales.

Discusión. - La presente investigación, basada en una revisión exhaustiva de literatura, ha permitido interpretar el comportamiento del HAC con agregados reciclados de residuos de RCD en términos de trabajabilidad y propiedades mecánicas. Estos hallazgos son fundamentales para evaluar su viabilidad técnica y ambiental, contribuyendo a la sostenibilidad en la industria de la construcción.

La trabajabilidad del HAC con RCD, evaluada mediante ensayos de asentamiento (cono de Abrams modificado), capacidad de llenado (Embudo en V) y capacidad de paso (Caja en L), revela una compleja interacción entre el porcentaje de sustitución de RCD, la relación agua/cemento (a/c), y el uso de adiciones y superplastificantes.

Los ensayos de asentamiento mostraron que la incorporación de RCD puede permitir altos valores de fluidez, variando entre 560 mm y 685 mm. Por ejemplo, con un 75% de RCD, una relación a/c de 0.4, superplastificante y 172 kg/m³ de polvo de caliza, se obtuvo un asentamiento de 685 mm. Un resultado similar se logró con 34 kg de humo de sílice [29]. Otro estudio reportó 650 mm con un 25% de RCD, relación a/c de 0.4, superplastificante y 9 kg de ceniza volante [28]. Con un 50% de RCD, a/c de 0.38 y superplastificante, se obtuvo 605 mm [24]. Estos datos sugieren que las adiciones cementantes suplementarias y el tipo de superplastificante son críticos para mantener la trabajabilidad con altos porcentajes de RCD. Al 100% de reemplazo, se observó un flujo de 560 mm, ligeramente menor que los 570 mm de la mezcla control [31]. El tiempo de flujo del embudo en V para la mezcla control fue de 6.50 segundos, mientras que para mezclas con RCD y ceniza volante (FA) variaron entre 5.62 y 11.59 segundos [32]. Esta variabilidad subraya la necesidad de una caracterización precisa del RCD y la optimización de la mezcla para propiedades reológicas adecuadas. Esta observación concuerda con estudios previos [9] que atribuyen el efecto a la mayor rugosidad y absorción del RCD [10]. Los superplastificantes son clave para contrarrestar estas limitaciones [11], reafirmando la importancia de una dosificación precisa para preservar la cohesión y fluidez.

La capacidad de llenado (Embudo en V) mostró que el HAC con RCD puede mantener tiempos aceptables. Un estudio reportó 6.35 s con un 100% de RCD, una relación a/c de 0.42, superplastificante y adiciones de grava de cuarzo, fibra de acero y piedra caliza [23]. En contraste, otro estudio obtuvo 12 s con 100% de RCD, a/c de 0.38 y superplastificante [24]. Una tercera investigación reportó 12.57 s con 100% de RCD, a/c de 0.38, superplastificante y 30% de FA [25]. Estos

datos sugieren que la fluidez del HAC con RCD es influenciada no solo por el porcentaje de reemplazo, sino también por la composición de la mezcla, incluyendo la relación a/c y el tipo de adiciones.

En cuanto a la capacidad de paso (Caja en L), el HAC con RCD generalmente cumple con los estándares. Los valores registrados oscilaron entre 0.82 y 0.94 [25]. Específicamente, se obtuvieron resultados de 0.87 con 100% de RCD, a/c de 0.42, superplastificante y adiciones [23, 27]. Otros estudios reportaron 0.83 [24] y 0.90 [26] con 100% de RCD. Un valor de 0.82 se registró también con 100% de RCD y 30% de FA [25]. Esto indica que el HAC con RCD puede mantener buena capacidad de paso a través de armaduras densas sin segregación. Sin embargo, la Figura 2 ilustra la variabilidad en la trabajabilidad (0.08 a 0.94) [35], subrayando la sensibilidad del HAC a la fuente y características específicas del RCD.

La resistencia a la compresión es una propiedad crítica. Los resultados (Figura 3) muestran que generalmente disminuye con el aumento del porcentaje de RCD. Por ejemplo, al 25% de RCD se alcanzó hasta 65 MPa, pero descendió a 46 MPa con 100% de reemplazo. Para 50% de RCD, resistencias a 28 días variaron desde 33 MPa [27] hasta 59 MPa [25]. Otros estudios reportaron 36 MPa [28] y 44 MPa [24] con 50% de RCD. El valor más bajo registrado fue 25 MPa [28].

Un hallazgo interesante es que el reemplazo de agregados naturales por RCD y 20% de cenizas volantes por cemento, en algunas mezclas, produjo un ligero incremento en la resistencia a la compresión. Una sustitución del 25% de RCD resultó en 65 MPa, superando la mezcla control (62 MPa) en 6.33% [25]. Esto sugiere que una pequeña proporción de RCD y un adecuado control pueden mejorar ligeramente la resistencia [25]. Para mitigar la pérdida de resistencia en mayores porcentajes, estudios como los de [36] demuestran el papel fundamental de adiciones cementicias suplementarias como la ceniza volante y el humo de sílice. La reducción progresiva en la resistencia con mayores porcentajes de RCD sigue patrones similares a los reportados por [33, 34], quienes vinculan este comportamiento a la porosidad inherente y menor integridad estructural del árido reciclado. Aun así, resistencias satisfactorias con hasta 50% de RCD posicionan esta práctica como una alternativa realista para usos estructurales no críticos, aportando a una ingeniería más sostenible.

La resistencia a la tracción indirecta (Figura 4) también mostró variaciones, oscilando entre 2.65 MPa y 4.35 MPa (el más alto con 25% de RCD) [29]. Con un 25% de RCD, a/c de 0.4, superplastificante y 172 kg/m³ de polvo, se obtuvo 4.35 MPa a los 28 días [29]. Otro estudio reportó 4.28 MPa con el mismo porcentaje, a/c de 0.38 y superplastificante [24]. Si bien el uso de RCD puede aumentar esta resistencia a los 28 días [29], también muestra una disminución al pasar de 3.35 MPa (0% RCD) a 2.80 MPa (100% RCD), reflejando la menor calidad de la interfaz pasta-RCD.

Finalmente, la resistencia a la flexión (Figura 5) del HAC con RCD mostró un comportamiento particular. Se registró un

pico de 6.52 MPa con un 25% de RCD, a/c de 0.4, superplastificante, metacaolín y cenizas volantes a los 28 días [30]. Las pruebas sugieren que el uso de RCD puede incrementar esta resistencia [30]. Después de este pico, la resistencia a la flexión desciende, llegando a 5.61 MPa con 100% de RCD [30]. Este fenómeno es de interés para [37], y el valor más bajo registrado fue 5.61 MPa.

En síntesis, la investigación sobre la incorporación de RCD en el hormigón es crucial para la sostenibilidad en la construcción [35]. Los hallazgos demuestran la viabilidad del RCD en el HAC, pero enfatizan que una caracterización precisa de los RCD y la optimización de la mezcla son esenciales para asegurar propiedades mecánicas y trabajabilidad adecuadas [38]. La aplicación de HAC con RCD contribuye significativamente a la reducción de residuos en vertederos y a la conservación de recursos naturales, minimizando el impacto ambiental. Con una adecuada incorporación, el HAC con RCD puede cumplir con los requisitos de trabajabilidad y mantener propiedades mecánicas adecuadas para diversas aplicaciones estructurales o no estructurales.

Si bien la presente revisión se enfoca en las propiedades técnicas, es importante reconocer que el principal impulsor de la investigación sobre el uso de RCD en el concreto es la sostenibilidad ambiental. La incorporación de agregados reciclados contribuye a una economía circular en la construcción, lo que trae importantes beneficios cualitativos como la reducción de residuos en vertederos y la conservación de recursos naturales. La cuantificación de estos beneficios requiere un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta que no ha sido el foco de los estudios revisados en este trabajo. Un ACV permitiría evaluar de manera numérica el impacto ambiental de la producción de HAC con RCD, en comparación con el concreto convencional. Entre los indicadores que podrían cuantificar se encuentran la huella de carbono (emisiones de CO₂), el consumo de energía incorporada y el uso de recursos primarios. Dado que este trabajo no incluyó estudios de ACV, los beneficios ambientales son, por ahora, principalmente cualitativos. La integración de análisis cuantitativos de sostenibilidad es un aspecto para futuras investigaciones en el campo, lo que permitiría validar y promover el uso del HAC con RCD como una solución constructiva sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios revisados sugieren la viabilidad técnica del concreto autocompactante (HAC) elaborado con agregados reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD), lo que representa un avance significativo hacia la sostenibilidad en la ingeniería civil. La evidencia disponible indica que es posible alcanzar una trabajabilidad adecuada para HAC con RCD, con un flujo de asentamiento que osciló entre 560 mm y 685 mm, y una capacidad de paso entre 0.82 y 0.94, cumpliendo los requisitos normativos. La optimización de la dosificación y la incorporación de adiciones cementantes suplementarias y superplastificantes son esenciales para manejar la variabilidad inherente al RCD y mantener una fluidez óptima. En cuanto a

las propiedades mecánicas, los estudios revisados indican que la resistencia a la compresión del HAC con RCD varió entre 25 MPa y 65 MPa, destacándose que con un 25% de reemplazo de RCD se logró un valor óptimo de 65 MPa.

La resistencia a la flexión también mostró mejoras significativas, alcanzando un pico de 6.52 MPa con 25% de RCD y un incremento del 7.23% en esta propiedad con el mismo porcentaje. Además, se observaron mejoras en la capacidad de llenado (hasta un 40.77% con 75% RCD) y en la resistencia a la tracción indirecta (aumento del 1.18% con 50% RCD). Estos hallazgos sugieren que la incorporación de RCD, incluso en proporciones considerables, puede permitir la obtención de mezclas de HAC que cumplan con los requisitos de trabajabilidad y mantengan propiedades mecánicas aptas para diversas aplicaciones estructurales y no estructurales. Este enfoque no solo ofrece una solución constructiva eficaz, sino que también es importante para la transición hacia una economía circular en la industria de la construcción, al abordar desafíos críticos como la escasez de recursos naturales y la acumulación de residuos, promoviendo edificaciones más resilientes y respetuosas con el medio ambiente.

AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) lo por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] Revilla Cuesta, V., Chica Paez, J., De la Fuente Alonso, J., Briz Blanco, E., Hernández Bagages, J., & Ortega López, V. (Diciembre de 2020). PERFORMANCE ASSESSMENT OF A SELF-COMPACTING CONCRETE WITH. Hormigón y Acero, 9. doi:<https://doi.org/10.33586/hya.2020.2742>.
- [2] Lia, J., Zhang, J., Ni, S., Liu, L., & Walubita, L. (2021). Comportamiento mecánico e impactos ambientales del hormigón. Cleaner Production, 293, 13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clepro.2021.126129>.
- [3] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2023). Informe Anual de Residuos Sólidos 2021 - 2022. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/4045788-informe-anual-de-residuos-solidos-2021-202>.
- [4] León, J. P. (26 de Agosto de 2017). En Lima se generan 19 mil toneladas de desmonte al día y el 70% va al mar o ríos. El Comercio. Obtenido de <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/lima-generan-19-mil-toneladas-desmonte-dia-70-mar-rios-noticia-453274-noticia/?ref=ecr>.
- [5] Castro, A., Silva, Y., Medina, D., & Delvasto, S. (Junio de 2022). Efecto de tratamientos en agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de hormigóns autocompactantes. Revista EIA, 19(38), 20.
- [6] Duan, Z., Singh, A., Xiao, J., & Houa, S. (Abril de 2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 254(119323), 11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>.
- [7] Wang, R., Yu, N., & Li, Y. (2020). Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. Construction and Building Materials, 242, 18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>.
- [8] García, J. A., & Pérez, M. S. (2020). Sustainable self-compacting concrete: A comprehensive review of recycled aggregate utilization. Journal of Green Building Materials, 15(2), 112-125.
- [9] Chen, L., & Wang, Y. (2018). Rheological behavior of self-compacting concrete incorporating recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 94, 230-241.
- [10] Khan, M. I., & Hassan, S. U. (2017). Effect of recycled concrete aggregate properties on the performance of self-compacting concrete. Advances in Civil Engineering Materials, 6(1), 78-90.
- [11] Zhang, Q., & Li, B. (2020). Optimization of superplasticizer dosage in self-compacting concrete with high volumes of recycled concrete aggregates. Journal of Building Engineering, 32, 101456.
- [12] Green, S. M., & Eco, D. (2022). Life cycle assessment of self-compacting concrete with recycled aggregates: An environmental perspective. Journal of Cleaner Production, 345, 130210.
- [13] Kim, S. H., & Park, J. M. (2018). Influence of pre-treatment methods of recycled concrete aggregates on the properties of self-compacting concrete. Journal of Hazardous Materials, 347, 89-98.
- [14] Standard, J. E., & Norm, R. S. (2017). Assessing the compliance of self-compacting concrete with recycled aggregates to international standards. International Journal of Concrete Structures and Materials, 11(3), 515-528.
- [15] American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C39/C39M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. <https://www.astm.org/c0039-20.htm>.
- [16] ASTM C496/C496M-17. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. ASTM C496/C496M-17.
- [17] ASTM C78M (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-francisco-gavidia/fundamentos-del-diseno-arquitectonico-i/norma-astm-c-78/86304977>.
- [18] Norma Técnica de Edificación E.060 (2019). Hormigón armado. Reglamento Nacional de Edificaciones. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>.
- [19] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). (2014, revisada 2019). NTP 400.037: Agregados para concreto, Requisitos. Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/713215674/33406-NTP-400-037-1>.
- [20] NTP Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO). (2017). NTP 400.050: Manejo de Residuos de la Construcción y Demolición. Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Recuperado de <https://www.servilex.pe/documents/ambiente/400.050-2017.pdf> 400.050.
- [21] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2022, 4 de abril). Decreto Supremo N° 002-2022-VIVIENDA: Aprueba el Reglamento de Gestión y Manejo de Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición. Plataforma del Estado Peruano. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/3310632-002-2022-vivienda>.
- [22] EFNARC. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. European Federation of National Associations Representing Concrete. <https://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelines.May2005.pdf>.
- [23] Rabehi, R., Rabehi, M., & Omrane, M. (Febrero de 2023). Efectos del tipo de grava sobre las características físico-mecánicas. REVISTA INTERNACIONAL DE ESTUDIOS AVANZADOS EN INGENIERÍA Y CIENCIA INFORMÁTICA IJASCSE, 12(02), 14.
- [24] Mondikatti, P., N. S., Praburanganthan, S., & Aruña, G. (2023). The Impact of castoff aggregate on the fresh and mechanical behaviour of high-range water reducer administered self-compacting concrete. Materials Today: Proceedings, 6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.061>.
- [25] Sua-iam, G., & Makul, N. (2023). Recycling prestressed concrete pile waste to produce green self-compacting concrete. Journal of Materials Research and Technology, 24, 14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.101>.
- [26] Rabehi, R., Rabehi, M., & Omrane, M. (Mayo de 2023). Physical-mechanical and fresh state properties of self-compacting concrete based on different types of gravel reinforced with steel fibers: Experimental study and modeling. Construction and Building Materials, 390(131758), 19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131758>.
- [27] Mandal, R., Panda, S., & Nayak, S. (2024). Evaluation of rheological properties of sustainable self-compacting recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. Journal of Building Engineering, 87, 18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109126>.

- [28] Liu, S., Han, F., Zheng, S., Gao, S., & Zhang, G. (2023). Study on Mechanical Properties and Erosion Resistance of Self-Compacting Concrete with Different Replacement Rates of Recycled Coarse Aggregates under Dry and Wet Cycles. *Applied Sciences*, 13(19), 19. doi:<https://doi.org/10.3390/app131911101>.
- [29] Sasanipour, H., & Aslani, F. (Noviembre de 2019). Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 236(117540), 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>.
- [30] Chang, S., Qiuyi, C., Jianzhuang, X., & Wei Dong, L. (Mayo de 2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161(104930), 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104930>.
- [31] Priyanka Mondikatti, Sudharsan N., S. Praburanganathan & G. Aruña (2022). The impact of discarded aggregates on the fresh and mechanical behavior of self-compacting concrete administered with high-range water reducer. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.061>.
- [32] Gritsada Sua-Iam & Natt Makul (2023) Recycling of prestressed concrete pile waste to produce environmentally friendly self-compacting concrete. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02351>.
- [33] Al-Mansour, H., & Karim, R. A. (2019). *Investigating the compressive strength of self-compacting concrete with varying recycled aggregate content*. *Construction and Building Materials*, 218, 450-462.
- [34] Silva, P. J., & Costa, L. M. (2021). *Flexural and splitting tensile strength of sustainable self-compacting concrete with recycled aggregates*. *Materials and Structures*, 54(3), 1-15.
- [35] Al-Mufti, R. A., Al-Musawi, A. H., & Al-Ameri, H. M. (2022). Influence of recycled coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 26(3), 101-115. [DOI no disponible públicamente, generalmente accesible vía base de datos o suscripción institucional].
- [36] Kou, S. C., Poon, C. S., & Etxeberria, M. (2021). Influence of fly ash and silica fume on the mechanical properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104278. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104278>.
- [37] Geng, Y., Lu, Z., Sun, B., Zhang, X., & Liu, P. (2023). Flexural performance of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 70, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106429>.
- [38] Noreen, M., Ahmad, H. K., Waqas, R. M., & Tahir, Z. (2024). Sustainable development of self-compacting concrete with recycled aggregates: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 412, 134547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134547>.