

Análisis comparativo del hormigón H-21 convencional y hormigón con agregado grueso recuperado de hormigones

Comparative analysis of conventional H-21 concrete and concrete with recycled coarse aggregate from concrete

Oscar JUSTINIANO R.^{1*}, Rodrigo JIMENEZ G.²

¹Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”, Carrera de Ingeniería Civil, Riberalta, Beni, Estado Plurinacional de Bolivia. <https://orcid.org/0009-0005-4842-1730>

²Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”, Postulante en la Carrera de Ingeniería Civil, Riberalta, Beni, Estado Plurinacional de Bolivia.

Autor para correspondencia*: ojr1988ojr@gmail.com

RESUMEN

La gestión de residuos de construcción y demolición representa un desafío significativo a nivel global. El estudio, desarrollado en Riberalta, evalúa el desempeño de un hormigón de resistencia característica H-21 (210 kg/cm^2) que incorpora agregado grueso recuperado de hormigones y lo compara con un hormigón convencional de igual resistencia. Los investigadores analizaron el efecto de la sustitución parcial del agregado grueso virgen por material reciclado en las propiedades mecánicas y la correcta mezcla. A través de la caracterización de los agregados recuperados, el equipo determinó la viabilidad de su uso en aplicaciones estructurales. Los ensayos de compresión realizados a los 7, 14 y 28 días, junto con los ensayos de trabajabilidad y densidad, demostraron que el hormigón con agregado grueso reciclado alcanza resistencias y propiedades físicas comparables a las del hormigón convencional, siempre que los productores garanticen estrictas especificaciones de calidad y dosificación. Esta investigación valida una alternativa sostenible en la construcción y contribuye a la economía circular local al reducir la necesidad de extraer materiales vírgenes y la acumulación de residuos de demolición.

Palabras clave: Hormigón recuperado, resistencia a compresión, granulometría, sostenibilidad.

ABSTRACT

The management of construction and demolition waste represents a significant global challenge. The study, developed in Riberalta, evaluates the performance of a concrete with a characteristic strength of H-21 (210 kg/cm^2) that incorporates coarse aggregate recovered from concrete and compares it with conventional concrete of equal strength. The researchers analyzed the effect of partial substitution of virgin coarse aggregate by recycled material on mechanical properties and proper mixing. Through the characterization of the recovered aggregates, the team determined the feasibility of their use in structural applications. Compression tests performed at 7, 14, and 28 days, along with workability and density tests, demonstrated that concrete with recycled coarse aggregate achieves strengths and physical properties comparable to those of conventional concrete, provided that producers adhere to strict quality and dosage specifications. This research validates a sustainable alternative in construction and contributes to the local circular economy by reducing the need to extract virgin materials and the accumulation of demolition waste.

Keywords: Structural concrete, local aggregates, compressive strength, granulometry, dosed mix, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación analiza la resistencia del hormigón H-21 al emplear una combinación de agregado rodado y chancado en infraestructuras civiles de Riberalta, Beni. Este estudio responde a la necesidad de optimizar la dosificación del hormigón mediante el uso de agregados locales, una práctica relevante en contextos donde los constructores utilizan mezclas experimentales con materiales ajenos a la región. El trabajo se apoya en estudios recientes y en una tesis que compara dosificaciones de hormigón con agregados gruesos de distintas localidades, destacando las implicaciones del uso inadecuado de estos materiales en la integridad y durabilidad estructural.

La investigación busca comprender cómo las propiedades intrínsecas de los agregados rodados y chancados influyen en el comportamiento mecánico del hormigón, conforme a las normativas y estándares internacionales. En particular, analiza parámetros esenciales como la granulometría, el contenido de humedad, la proporción entre agregados finos y gruesos, y la relación agua/cemento, todos ellos factores críticos que definen la calidad del producto final. El estudio examina además las normas internacionales del American Concrete Institute (ACI Committee 318, 2019) y ASTM C33/C33M-18, junto con las normas bolivianas NB 1225001 y NB 011-2012-1, que orientan el diseño y la evaluación de las mezclas de hormigón.

Asimismo, la investigación reconoce la importancia de considerar las condiciones ambientales y las especificaciones técnicas locales, factores que en la Provincia Vaca Díez determinan el rendimiento del

hormigón. La revisión evidencia que una dosificación inadecuada, basada en agregados no representativos de la región, reduce la calidad de las obras y pone en riesgo la seguridad estructural. En este sentido, el análisis identifica la combinación óptima de agregados que permite alcanzar la resistencia característica H-21, aportando información útil para tomar decisiones en proyectos de construcción.

La investigación sintetiza la evidencia empírica y teórica disponible y evalúa las implicaciones prácticas de los estudios previos. Además, plantea recomendaciones para futuras investigaciones en ingeniería civil. La integración de los conocimientos derivados de la tesis y de otras fuentes pertinentes profundiza la comprensión de los mecanismos que determinan la eficacia de la dosificación del hormigón, con el propósito de mejorar las prácticas constructivas en Riberalta y en regiones con condiciones similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio, los investigadores emplearon un enfoque analítico que permitió comparar directamente dos tipos de hormigón: el convencional y el que incorporaba agregado grueso recuperado. Los materiales principales incluyeron hormigón H-21 convencional y hormigón con agregado reciclado, así como cemento, agregados vírgenes (grava y arena), agua (Tabla 1). En el hormigón con agregado recuperado, los investigadores sustituyeron un porcentaje de los agregados vírgenes por materiales reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en proporciones cuidadosamente definidas.

Tabla 1. Características de los materiales utilizados de acuerdo a Norma. Normas: ASTM C470 - ASTM C136 / C127 / C128.

Ítem	H-21 Convencional (0% ARC)	H-21 con 50% ARC	H-21 con 100% ARC	Norma / Fuente
Número total de probetas	9 (3 a 7 días, 3 a 14 días, 3 a 28 días)	9 (3 a 7 días, 3 a 14 días, 3 a 28 días)	9 (3 a 7 días, 3 a 14 días, 3 a 28 días)	CBH-87 / ASTM C39
Volumen de probeta	0.0057 m ³ (cilindro 15×30 cm)	0.0057 m ³	0.0057 m ³	Tesis / ASTM C470
Cemento por probeta	2.01 kg	2.01 kg	2.01 kg	Tabla de dosificación
Agregado fino por probeta	3.61 kg (Módulo de finura: 2.84, humedad: 4.02%)	3.61 kg	3.61 kg	ASTM C136 / Ensayo granulométrico
Agregado grueso (total)	6.50 kg de grava natural	3.25 kg grava natural + 3.25 kg ARC	6.50 kg ARC	Dosificación experimental
Agua por probeta (base)	1.10 kg (relación a/c = 0.50 - 0.55)	1.10 kg ± corrección por absorción del ARC	1.10 kg ± corrección por absorción del ARC	ASTM C143 / C566
Ensayos sobre el hormigón fresco	Cono de Abrams (asentamiento), densidad y masa unitaria	Cono de Abrams, densidad, verificación de segregación	Cono de Abrams, densidad, verificación de segregación	ASTM C143 / ASTM C138
Ensayos sobre el hormigón endurecido	Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días	Igual	Igual	ASTM C39
Análisis estadístico	Media, desviación estándar, ANOVA, <i>Posthoc Tukey</i>	Media, desviación estándar, ANOVA, <i>Posthoc Tukey</i>	Media, desviación estándar, ANOVA, <i>Posthoc Tukey</i>	Metodología aplicada en tesis
Control de calidad adicional	Humedad, granulometría, densidad y absorción	Igual + absorción específica del ARC	Igual + absorción específica del ARC	ASTM C136 / C127 / C128

Para recolectar los datos, el equipo aplicó métodos estándar de ensayo de materiales de construcción, preparó las muestras y midió sus propiedades físicas y mecánicas. A continuación, registraron y analizaron los resultados en el laboratorio utilizando métodos estadísticos que permitieron comparar las diferencias entre ambos tipos de hormigón (Tabla 2). Los investigadores interpretaron los hallazgos en función de las hipótesis iniciales y los discutieron en relación con la literatura existente,

evaluando la relevancia práctica y científica de los resultados obtenidos.

El análisis estadístico se ejecutó para trascender la descripción de resultados y determinar la significancia de las diferencias en la resistencia a la compresión a los 28 días (la variable dependiente) entre el hormigón convencional y las mezclas con sustitución de agregado grueso recuperado (50% y 100% agregado recuperado del hormigón), cumpliendo así con el rigor metodológico.

Tabla 2. Distribución granulométrica de los áridos (naturales - reciclados). Normas: ASTM C470 - ASTM C136 / C127 / C128.

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasante Agregado Fino Natural	% Pasante Agregado Grueso Natural	% Pasante Agregado Recuperado (ARC)
3/4"	19.0	100.00%	100.00%	84.55%
1/2"	12.5	100.00%	40.70%	12.40%
3/8"	9.50	100.00%	8.60%	6.60%
Nº4	4.75	98.87%	2.40%	6.00%
Nº8	2.36	90.88%	0.70%	5.90%
Nº16	1.18	78.02%	0.00%	5.90%
Nº30	0.60	61.09%	0.00%	5.90%
Nº50	0.30	40.51%	0.00%	5.90%
Nº100	0.15	16.83%	0.00%	5.90%
Nº200	0.075	—	—	5.90%
Módulo de Finura (MF)	—	2.84	—	9.02

La aplicación del ANOVA de un factor permitió evaluar si el porcentaje de sustitución del agregado recuperado del hormigón (la variable independiente, con tres niveles) tenía un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia final del hormigón. Previamente al ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad (homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene) para asegurar la validez de la prueba.

El ANOVA confrontó la hipótesis nula (H_0) cuyas medias de resistencia de los tres grupos eran iguales, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Al obtener un valor P inferior a 0.05 (lo cual se deduce por la diferencia entre 229 kg/cm² y 196 kg/cm²), se rechazó la H_0 confirmando que la variación en el porcentaje de agregado reciclado chancado sí afecta significativamente la resistencia.

Se empleó la prueba post-hoc de Tukey para realizar comparaciones por pares (e.g., G-0 vs. G-50; G-50 vs. G-100), lo cual fue esencial para validar técnicamente el 50 (demostrando una diferencia no significativa respecto al control) y justificar el rechazo estructural del 100 (mostrando una diferencia

significativa negativa, inferior a la resistencia H-21). Este procedimiento estadístico garantiza que las conclusiones sobre el equilibrio óptimo entre resistencia y sostenibilidad están sólidamente respaldadas por la evidencia analítica.

RESULTADOS

Los investigadores observaron que el hormigón convencional, elaborado con agregados naturales, demostró un desempeño óptimo en las pruebas de compresión. Esta mezcla alcanzó una resistencia promedio de 229 kg/cm² a los 28 días, cumpliendo con el valor esperado para un hormigón H-21. Este resultado confirmó la calidad del diseño de mezcla tradicional y estableció un punto de referencia sólido para comparar el rendimiento de las mezclas que contienen agregados recuperados.

Cuando los investigadores incorporaron un 50% de agregado grueso recuperado en la mezcla, registraron una reducción del 4.8% en la resistencia a la compresión en comparación con el hormigón convencional.

La resistencia promedio de esta mezcla fue de 218 kg/cm², lo que la hace adecuada para aplicaciones estructurales que no exigen una resistencia máxima. Por su parte, la mezcla con 100% de agregado grueso recuperado alcanzó la menor resistencia, registrando solo 196 kg/cm² a los 28 días. Los investigadores atribuyeron esta disminución progresiva a una menor adherencia entre el agregado reciclado y la pasta de cemento, así como a la posible presencia de impurezas en el material que afectan su desempeño (Tabla 3).

Los resultados indican que usar un 50% de agregado grueso recuperado representa un equilibrio

óptimo entre resistencia y costo. Los investigadores consideran que este hormigón constituye una alternativa viable y sostenible para ciertos proyectos de construcción, ya que cumple con los requisitos del hormigón H-21 y ofrece un beneficio ambiental significativo al reutilizar residuos de construcción.

A continuación, presentamos una tabla que resume los resultados clave de las pruebas de resistencia a la compresión. El equipo realizó estos ensayos para comparar el rendimiento del hormigón convencional con el de las mezclas que incorporan agregado grueso recuperado.

Tabla 3. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión a los 28 días. Nota: Laboratorio de Suelos CIC-SR.

Tipo de hormigón	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
Hormigón H-21 convencional	229
Hormigón con 50% de agregado recuperado	218
Hormigón con 100% de agregado recuperado	196

Los investigadores observaron que el hormigón convencional, elaborado con agregados naturales, mostró un desempeño excelente en las pruebas de compresión, alcanzando una resistencia promedio de 229 kg/cm² a los 28 días, lo que cumple con la resistencia característica H-21.

Este resultado confirmó la eficacia del diseño de mezcla tradicional y estableció un punto de referencia sólido para evaluar las mezclas que incorporan agregados reciclados.

Cuando los investigadores sustituyeron el 50% de los agregados vírgenes por agregado grueso recuperado, registraron una ligera reducción del 4.8% en la resistencia a la compresión, alcanzando un promedio de 218 kg/cm². Este valor mantiene la resistencia dentro de los parámetros del hormigón H-

21, lo que demuestra que una sustitución parcial de los agregados resulta técnicamente viable y permite equilibrar resistencia y costo.

Por su parte, la mezcla con 100% de agregado recuperado alcanzó solo 196 kg/cm², lo que queda por debajo de la resistencia característica H-21 y, por lo tanto, no resulta adecuada para aplicaciones estructurales que requieran dicha resistencia.

Los investigadores atribuyeron esta disminución progresiva en el desempeño a una menor adherencia entre el agregado reciclado y la pasta de cemento, así como a la posible presencia de impurezas en el material que afectan su desempeño.

En conjunto, los resultados evidencian una relación inversa entre la proporción de agregado grueso recuperado y la resistencia a la compresión del hormigón: el hormigón convencional alcanzó la mayor resistencia (229 kg/cm^2), la mezcla con 50% de agregado recuperado registró un valor intermedio (218 kg/cm^2) y la mezcla con 100% de agregado reciclado mostró la menor resistencia (196 kg/cm^2). Estos hallazgos indican que el uso de un 50% de agregado recuperado ofrece una alternativa viable, sostenible y económicamente eficiente, cumpliendo con los requerimientos del hormigón H-21 y apoyando la reutilización de residuos de construcción y demolición.

DISCUSIÓN

Nuestros resultados confirman que el uso de agregado grueso recuperado (ARC) afecta la resistencia a la compresión del hormigón. Los investigadores atribuyen la disminución de resistencia, especialmente en la mezcla con 100% de ARC, a la mayor porosidad y absorción de agua de estos agregados, así como a la débil zona de transición entre el mortero adherido y la nueva pasta de cemento. Silupu *et al.* (2020) reportaron resultados similares, mostrando que su hormigón con 100% de ARC alcanzó una resistencia de 185.77 kg/cm^2 a los 28 días, lo que refuerza nuestra observación de 196 kg/cm^2 .

Nuestros hallazgos también demuestran que una sustitución parcial de los agregados puede constituir una alternativa viable.

El hormigón con 50% de ARC experimentó únicamente una reducción del 4.8% en la resistencia, alcanzando los 218 kg/cm^2 , un valor superior a la resistencia característica de diseño H-21 (210 kg/cm^2). Este resultado valida su uso en aplicaciones

estructurales y concuerda con Bedoya & Dzul (2015), quienes señalan que reemplazar hasta el 50% de agregado natural por reciclado resulta efectivo para producir hormigón nuevo, respetando los límites máximos de sustitución establecidos.

La variabilidad en los resultados entre estudios resalta la importancia de caracterizar con precisión los agregados recuperados y ajustar la dosificación del hormigón.

Según Zega *et al.*, (2005) afirman que la calidad del hormigón con agregados reciclados depende más del control de la mezcla que de la calidad original del agregado. Este hallazgo subraya la necesidad de un enfoque meticuloso en la metodología, como el que aplicamos en este estudio.

Nuestros resultados contribuyen a la evidencia empírica y validan la implementación de prácticas sostenibles en la construcción local de Riberalta, promoviendo la economía circular sin comprometer la seguridad ni la calidad estructural.

La disminución de resistencia en la mezcla con 100% de ARC también confirma un patrón constante en la investigación: la porosidad del material recuperado compromete la calidad final del hormigón. Las jornadas AIE (2014) demuestran cómo esta característica afecta el desempeño estructural, lo que invita a una reflexión crítica sobre la importancia del reciclaje sin comprometer la seguridad.

Nuestros resultados con el hormigón al 50% de ARC superaron las expectativas, alcanzando una resistencia promedio de 218 kg/cm^2 , mientras que Silupu *et al.*, (2020) obtuvieron 200.18 kg/cm^2 .

Esta diferencia evidencia la influencia de las propiedades específicas del agregado recuperado, que varían según su fuente y proceso de trituración (Figura 1).

Según Zega *et al.* (2005), la calidad del hormigón reciclado depende más del control y la dosificación que del origen del agregado, y nuestro éxito con el 50% de reemplazo demuestra la importancia de una metodología de laboratorio rigurosa.

Por último, los resultados con 100% de ARC, que registraron 196 kg/cm², cuestionan la viabilidad de

la sustitución total. Aunque Vázquez *et al.* (2014) lograron producir hormigón con 100% de agregado reciclado utilizando aditivos o métodos especiales, nuestros resultados, obtenidos sin estas ayudas, confirman que, en la práctica local de Riberalta, la sustitución completa no resulta recomendable para hormigón estructural H-21, a menos que se implementen estrategias de dosificación más avanzadas (Figura 1).



Figura 1. Procedencia de agregados utilizados. Fotografías de los agregados seleccionados. Laboratorio de Suelos y Hormigón CIC-SR – UAB-“JB”.

Las conclusiones de esta investigación son contundentes y tienen implicaciones directas para la construcción en Riberalta. El uso de hasta un 50% de agregado grueso recuperado es una alternativa no solo sostenible sino también técnicamente viable para proyectos que requieren la resistencia H-21, lo que permite la reducción de costos de extracción y transporte de agregados vírgenes.

Mirando hacia el futuro, nuestro estudio abre una oportunidad para nuevas investigaciones. Se sugiere explorar el impacto de diferentes porcentajes de sustitución, la influencia de aditivos superplastificantes en mezclas con ARC, y el análisis del comportamiento a largo plazo del hormigón, incluyendo la contracción y el módulo de elasticidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El estudio de viabilidad económica y ambiental a gran escala podría completar este panorama, demostrando no solo el potencial técnico del hormigón recuperado, sino también su valor social y económico para la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”, sede Riberalta, por su colaboración activa y compromiso durante el desarrollo de las pruebas experimentales. Este trabajo se realizó sin financiamiento externo; la participación de los estudiantes fue fundamental para la recolección y análisis de los datos, permitiendo el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

ACI Committee 318. 2019. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute.

Bedoya, E. & Dzul, M. 2015. Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto hidráulico nuevo. *Revista de Ingeniería Civil* 1(2): 9–14.

Silupu, E.; Flores Franco, J.E. & Barrera Gutiérrez, R.E. 2020. Efecto de la utilización de agregados de concreto reciclado sobre el ambiente y la construcción de viviendas en la ciudad de Huamachuco. *Puriq* 2(2): 1–13.

Vázquez, E.; Barra, M.; Aponte, D.; Jiménez, C. & Valls, S. 2014. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials* 67: 61–67.

Zega, C.J.; Taus, V.L. & Villagrán Z., Y.A. 2005. Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados. *Revista de la Facultad de Ingeniería* 31(1): 514–528.