



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

métodos &
materiales

Publicación Anual • Volumen 15 • Marzo 2026 • ISSN electrónico: 2215-4558

Evaluación del comportamiento de agregados reciclados en múltiples ciclos para la fabricación de nuevos concretos

Evaluation of the behavior of recycled aggregates in multiple cycles to manufacture new concrete

Nidia Cruz Zúñiga

Docente Investigadora
Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Costa Rica
nidia.cruz@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4416-0626>

José Luis Rodríguez Morales

Estudiante Ingeniería Civil
jose.rodriguezmorales@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0009-0001-0725-1393>

Fecha de recepción: 20 setiembre 2025 / Fecha de aprobación: 22 marzo 2026

Índices y Bases de Datos:

latindex

UCRIndex

REDIB

Dialnet

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

PERIÓDICA

biblat
Bibliografía Latinoamericana

ERIH PLUS
EUROPEAN REFERENCE INDEX FOR THE
HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558



revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales



lanamme.ucr.ac.cr



metodosymateriales.lanamme@ucr.ac.cr

Evaluación del comportamiento de agregados reciclados en múltiples ciclos para la fabricación de nuevos concretos

Evaluation of the behavior of recycled aggregates in multiple cycles to manufacture new concrete

Nidia Cruz Zúñiga

Docente Investigadora
Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Costa Rica
nidia.cruz@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4416-0626>

José Luis Rodríguez Morales

Estudiante Ingeniería Civil
jose.rodriguezmorales@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0009-0001-0725-1393>

Fecha de recepción: 20 setiembre 2025 / Fecha de aprobación: 22 marzo 2026

RESUMEN

Los agregados para la construcción representan un impacto potencial alto en el ambiente, y las fuentes son cada vez más escasas. La literatura muestra investigaciones sobre reciclaje de escombros para la producción de nuevos agregados y su utilización en concretos, pero no se tiene mucha evidencia del efecto de múltiples ciclos de reciclaje en este tipo de materiales. En esta investigación se estudiaron las características físicas, químicas y mecánicas del agregado grueso reciclado sometido a varios ciclos de reciclaje. Todo el material que se utilizó para reciclar fue de una misma fuente (concreto colado en sitio) y los procedimientos fueron realizados según a las normas vigentes INTE o ASTM que aplican. La metodología seguida inició con la caracterización del agregado grueso reciclado y se utilizó en un diseño de mezcla para concreto con una resistencia nominal (f'_c) de 21MPa. Se utilizaron distintas proporciones de sustitución de agregado reciclado: 30 % Reciclado – 70 % Natural, 50 % Reciclado – 50 % Natural y 100% Reciclado. Se realizaron los siguientes ensayos al agregado: análisis granulométrico, gravedad específica, densidad masiva, abrasión y reacción álcali-agregado. Se elaboraron en total 140 especímenes de concreto de prueba para todas las combinaciones en los 3 ciclos de reciclaje, fallándolos a los 7, 14 y 28 días según la norma vigente para la medición de resistencia a la compresión INTE C39:2022/COP 1:2023 (INTECO, 2022c). La investigación logró concluir que existe factibilidad técnica para la utilización de escombros para la obtención de agregado grueso en al menos tres ciclos de reciclaje, con algunas restricciones en cuanto al uso de los concretos por temas de cantidad de finos, abrasión, y reacción de alcalinidad. Particularmente, se determinó, además, que se requiere mayor investigación referente al efecto de la reacción álcali en la calidad y durabilidad de los concretos después del segundo ciclo de reciclado, especialmente en sustituciones de agregado tan significativas.

Palabras clave: Agregado grueso, residuos de construcción, reciclaje de concretos, gestión integral de residuos, economía circular.

ABSTRACT

Construction aggregates represent a high potential impact on the environment, and sources are increasingly scarce. The literature shows research on recycling rubble to produce new aggregates and their use in concrete, but there is not much evidence of the effect of multiple recycling cycles on this type of materials. In this research, the physical, chemical, and mechanical characteristics of recycled coarse aggregate subjected to several recycling cycles were studied. All the material that was used for recycling was from the same source (cast-in-place concrete) and the procedures were carried out according to the applicable INTE or ASTM standards. The methodology followed began with the characterization of the recycled coarse aggregate and was used in a mix design for concrete with a nominal resistance (f'_c) of 21MPa. Different proportions of recycled aggregate replacement were used: 30% Recycled – 70% Natural, 50% Recycled – 50% Natural and 100% Recycled. The following tests were carried out on the aggregate: granulometric analysis, specific gravity, mass density, abrasion, and alkali-aggregate reaction. A total of 140 test concrete specimens were made for all combinations in the 3 recycling cycles, failing them at 7, 14 and 28 days according to the current standard for measuring compressive strength INTE C39:2022/COP 1:2023 (INTECO, 2022c). The investigation was able to conclude that there is technical feasibility for the use of rubble to obtain coarse aggregate in at least three recycling cycles, with some restrictions regarding the use of concrete due to the amount of fines, abrasion, and alkalinity reaction. Particularly, it was also determined that further research is required regarding the effect of the alkali reaction on the quality and durability of concrete after the second recycling cycle, especially in such significant aggregate substitutions.

Keywords: Coarse aggregate, construction waste, concrete recycling, comprehensive waste management, circular economy.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es altamente demandante en materias primas. Particularmente en Costa Rica, uno de los principales productos que utiliza la construcción es el concreto. Al igual que en muchos otros países del mundo, la fuente principal de sus componentes son recursos naturales pétreos vírgenes, que cada vez están menos disponibles ambiental y económicamente. Dada dicha escasez, existen experiencias en otros países del aprovechamiento de fuentes secundarias, en especial escombros del mismo sector construcción, que son utilizados como material primas para suplir la necesidad de agregados. Según estudios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2011) en Costa Rica se genera anualmente gran cantidad de escombros, constituidos principalmente de residuos cementicios, lo que representa más de un 50% del volumen total de los residuos del sector. Lo anterior concuerda con lo indicado por diversos actores: los escombros son de los principales residuos de las construcciones costarricenses (Castro, 2019; Bolaños, 2021; Marín, 2021; Rimolo, 2021); estos estudios evidenciaron que un porcentaje alto, entre el 40 y 50% de los residuos del sector, corresponden a restos cementicios que podrían ser reciclados. Estos materiales no están siendo aprovechados y tienen gran potencial para insertarse en el flujo de recursos y contribuir a una economía más circular, pero que actualmente quedan en sitios de disposición final o en el ambiente.

Desde el planteamiento del primer Plan Nacional de Residuos Sólidos (PRESOL) en el año 2006, se había contemplado la necesidad de incluir normativa para propiciar la gestión integral de los residuos en el sector de la construcción. Al momento existen diversas guías de carácter voluntario (CFIA (2016), UICN (2011), entre otras) que buscan impulsar principios de manejo de residuos y de reutilización en la construcción, pero no se tiene un lineamiento detallado y obligatorio que demande el reciclaje de los escombros. Recientemente en julio de 2025 entró a regir el nuevo reglamento para la gestión de residuos de construcción y demolición (Decreto Ejecutivo N° 44843-S), este plantea un primer escenario regulatorio, pero aún muy voluntario en cuanto al reciclaje efectivo de estos residuos. La gestión de los residuos sólidos resulta ser un problema más político que técnico o económico, debido a que si no se tiene una obligatoriedad explícita de reutilización es difícil impulsar la circularidad del sector. Existen esfuerzos del ente rector por impulsar la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) en la construcción; sin embargo, al momento la normativa es muy nueva y requiere consolidar aún los esfuerzos de los

potenciales gestores, y mientras tanto los residuos tipo escombros siguen desaprovechándose, y en algunos casos contribuyendo a un alto impacto ambiental al quedar dispersos en la naturaleza de forma indebida.

Como parte de los antecedentes para esta investigación, se habían trabajado en caracterizar los agregados reciclados provenientes de escombros en Costa Rica, utilizando para ellos diferentes fuentes en cuanto a los materiales base a reciclar (Cruz y Ramírez, 2022). Esas primeras investigaciones arrojan resultados favorables de resistencia de los nuevos concretos, siempre y cuando se cumpla con un diseño de mezcla específico y con algunas particularidades en su proceso de producción. Uno de los aportes más relevantes y que dan pie a esta segunda investigación es la incertidumbre en como influyen los ciclos de reciclaje en la calidad de los agregados reciclados, con el fin de determinar la factibilidad o no de múltiples ciclos de reciclaje de los escombros.

Los pioneros en el reciclaje de escombros corresponden principalmente a países de la Unión Europea, como por ejemplo España, Países Bajos y Bélgica, donde se tienen normas de reutilización que les exige que cierto porcentaje de recuperación de materiales sea tratado en reciclaje o en su adecuado vertimiento (Rodríguez y Cruz; 2023). La escasez de recursos naturales es la principal razón que ha impulsado el desarrollo y la investigación de los materiales reciclados en estos países, en especial para suplir las necesidades del mercado del concreto (Remolina, 2018). En Latinoamérica, se tienen experiencias exitosas incluso de materiales ya colocados en el mercado, en especial en Colombia y Brasil. Algunas investigaciones realizadas en Perú (Armando, 2014; Rodrich y Silva, 2018) reflejan resultados positivos que permiten promover el uso de escombros para producir agregados reciclados. En Colombia también se ha estudiado el tema del reciclaje de escombros por diferentes autores con resultados prometedores en cuanto a resistencias alcanzadas y porcentajes de sustitución (Hincapié y Aguja, 2003; Remolina, 2018). A nivel nacional Cruz y Ramírez (2022) también han realizado experimentación al respecto como se indicó.

La investigación que respalda este artículo tuvo como fin dotar al país de datos concretos respecto al potencial técnico del uso de agregados reciclados para la construcción. El objetivo de la investigación específica que se presenta a continuación fue evaluar el comportamiento de la reutilización cíclica del agregado grueso, proveniente de concreto colado in situ, para ser utilizado en nuevos concretos.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

El proceso metodológico de esta investigación contempló una serie de pasos. Primeramente, se realizó una investigación de fuentes secundarias, para determinar el estado del arte en cuanto al reciclado de escombros. En una segunda etapa se trabajó en el laboratorio, para lo cual se seleccionó un tipo de material a reciclar, que en este caso consistió en especímenes de concretos colados en sitio, los que se obtuvo de recolectar especímenes de falla almacenados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica, y que habían sido utilizados en cursos o ensayos de este laboratorio en el semestre anterior a la investigación; por lo que es importante indicar que el material recolectado no tenía más de un año de fraguado. Este material de base se trituro utilizando un equipo mecánico tipo quebrador de muelas marca “MASSCO”. Cabe destacar que no se realizó ningún lavado ni algún otro proceso previo a la trituración del material. Luego el material resultante se caracterizó, para lo cual se seleccionaron una serie de ensayos de laboratorio básicos que se aplican a todo tipo de agregados para la construcción. Paralelamente se prepararon las muestras de material reciclado; además se trabajó una muestra de material virgen (utilizado como patrón) y se realizaron los ensayos de laboratorio correspondientes. Posteriormente, se realizaron diseños de mezcla de concreto, basado en los resultados de la caracterización en cada ciclo, y se seleccionaron otros ensayos adicionales importantes para evaluar la calidad técnica de las mezclas que utilizan el material reciclado. Todo este procedimiento se repitió de igual forma tres veces, tomando como material base a quebrar para el segundo y tercer ciclo, los residuos de los especímenes del ciclo anterior. Finalmente, se procedió a la etapa de análisis de resultados, en la cual se realizó una comparación de las características físicas de los agregados en los tres ciclos de reciclaje contra el patrón. A continuación, se presentan algunos detalles de los métodos utilizados para esta investigación:

2.1. Detalles de los ensayos de laboratorio

Todos estos ensayos se realizaron bajo las normas INTECO y ASTM correspondientes en su versión vigente; con la salvedad de que las normas corresponden a agregados vírgenes, ya que en el país no hay normas específicas para agregados reciclados. Los ensayos por considerar fueron: análisis granulométrico (INTE C46 (ASTM C136)) (INTECO, 2020b), reducción de tamaño (INTE C62 (ASTM C702)) (INTECO, 2020c); densidad masiva y porcentaje de vacíos en los agregados

(INTE C58 (ASTM C29)) (INTECO, 2025b), gravedad específica y la absorción del agregado grueso (INTE C68 (ASTM C127)) (INTECO, 2016); resistencia al desgaste o abrasión (INTE C64:2022 (ASTM C131)) (INTECO, 2022d). Como el fin era comparar la variabilidad de las características de los agregados vírgenes y reciclados, se decidió seguir dichos estándares que son los oficiales en el país. Es importante anotar que si se busca impulsar el uso de materiales pétreos reciclados en el país se necesita crear nuevas normativas para agregados reciclados, que puedan comprobar mejor su efectividad para ser utilizados en nuevos concretos.

Posteriormente, tomando en cuenta la caracterización total de los agregados reciclados, se prepararon los diseños de mezcla correspondiente a un $f'c = 21\text{MPa}$, para las tres combinaciones seleccionadas para el estudio: 30% reciclado – 70 % natural, 50% reciclado – 50 % natural y 100 % agregado reciclado. Para cada serie de trabajo se realizaron 17, 14 y 10 especímenes de cilindros de 100 x 200 mm respectivamente para el I, II y III ciclo, los cuales se llevan a falla en múltiplos de 5, y con edades de 7, 14 y 28 días. Se trabajó con un patrón con agregado grueso 100% natural solamente en el primer ciclo de análisis. En cada ciclo de reciclaje se lograban menos cantidad de especímenes debido a las pérdidas de material al triturar.

La preparación y curado de los cilindros siguió la norma correspondiente (INTE C18 (ASTM C192)) (INTECO, 2022b). Se midieron las características del concreto también bajo las normas correspondientes: asentamiento (INTE C41 (ASTM C143:)) (INTECO, 2020a); temperatura (INTE C46 (ASTM C1064) (INTECO, 2020b); contenido de aire (INTE C42 (ASTM C231M) (INTECO, 2017) y densidad masiva fresca (INTE C72 (ASTM C138)) (INTECO, 2018). Para la falla se utilizó la máquina de falla marca HUMBOLDT propiedad del LanammeUCR, la cual no utilizan almohadillas de neopreno para la realización del ensayo de los cilindros. Este procedimiento se realizó de forma análoga para los ciclos 2 y 3 según todo lo descrito.

Como el fin era estudiar efectos del reciclaje cíclico se trabajó, además, con la reacción de la reactividad alcalina de combinaciones de Cemento-Agregado (INTE C167 (ASTM C1260)) (INTECO, 2022e), con el fin de evaluar el efecto de una reacción lenta que ocurre internamente en la masa de concreto, producto de la reactividad de algunos minerales de los agregados y los hidróxidos alcalinos comunes del cemento. Se consideró que este ensayo era relevante debido a que con cada ciclo de reciclaje la presencia de cemento en la mezcla es mayor, lo que podría traer efectos adversos en el concreto (Calvante, et all. 2011).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de los agregados reciclados producidos con escombros

Una vez que se contó con el material quebrado en cada ciclo se procedió a estimar las granulometrías directas del material y compararlas con un material natural. En todos los ciclos se obtuvo granulometrías que no cumplían directamente con la granulometría modelo especificada para la producción de concretos según INTE C15:2015 (ASTM C33:2018) (INTECO, 2022a), en especial por el módulo de finura, ya que los valores obtenidos sobrepasan lo permitido: entre 2.35 y 3.15 (Gonzales, 2003). De la literatura se esperaba que, conforme pasaban los ciclos de reciclaje se tuviera un aumento de la cantidad de finos que corresponde al material pasando por la malla 200. El primer ciclo de

reciclaje arrojó una cantidad de 5.9 g de finos, de los 50 kilogramos que inicialmente tenía la muestra; para la segunda molienda esta cantidad aumentó a 8.5 g, y para la tercera molienda la cantidad rondó los 27.5 g; lo que evidenció que el tercer ciclo de reciclado del mismo material lo vuelve mucho más propenso a producir finos, casi 4.5 veces más que el primer ciclo de reciclaje. En vista de estos resultados se decidió corregir las granulometrías según lo que estipula la graduación No.7 especificada en la norma correspondiente, debido a que el agregado natural utilizado cumplía con esta graduación y así se podría garantizar una mejor comparación con la muestra patrón. Este fue uno de los primeros resultados relevantes, ya que se evidencia que para utilizar agregados reciclados se va a requerir ajustar la granulometría y eliminar los finos. La Figura 1, la Figura 2 y la Figura 3 muestran las granulometrías con las que se trabajó en cada ciclo.

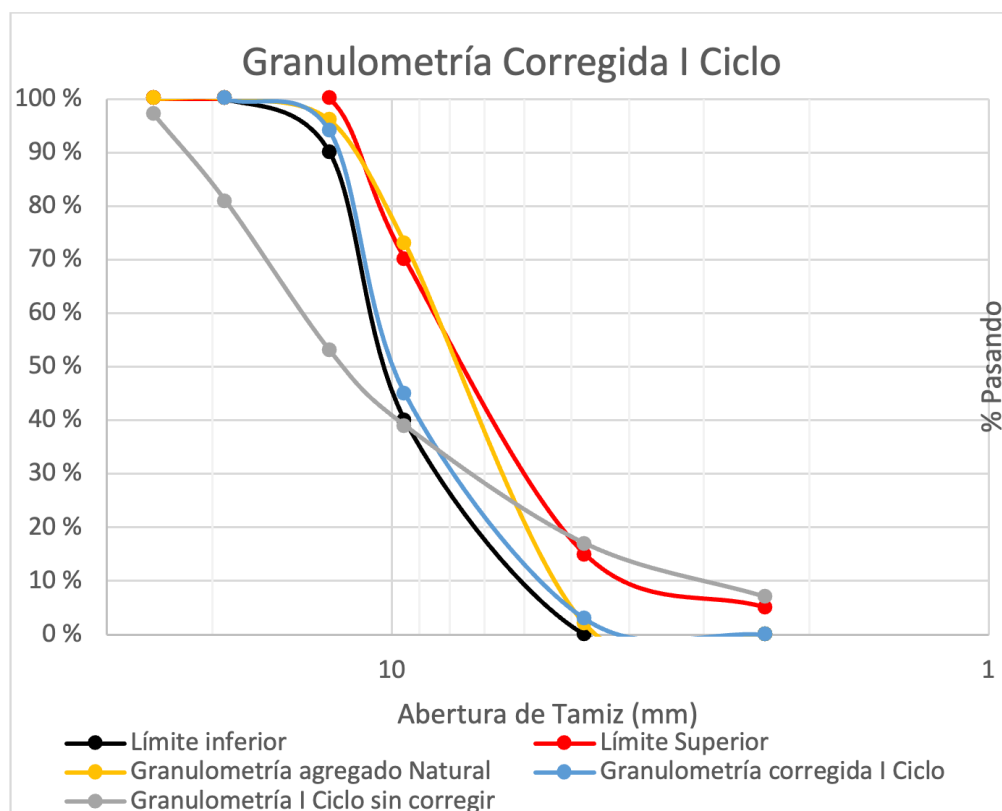


Figura 1. Gráfico de granulometría corregida del I Ciclo de reciclaje

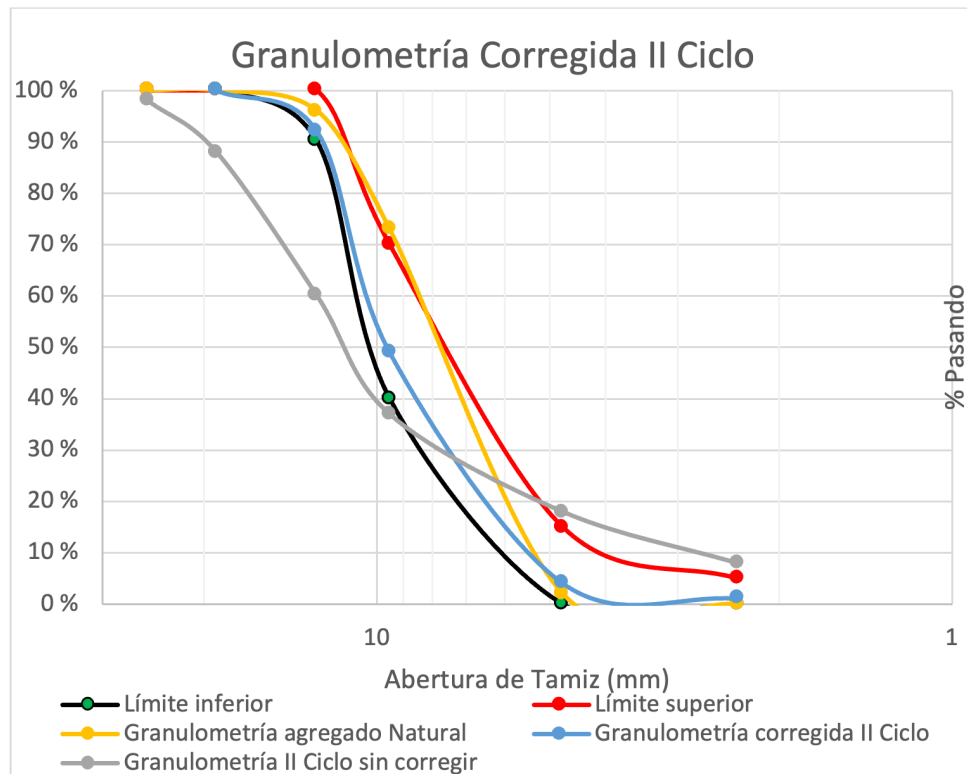


Figura 2. Gráfico de granulometría corregida del II Ciclo de reciclaje

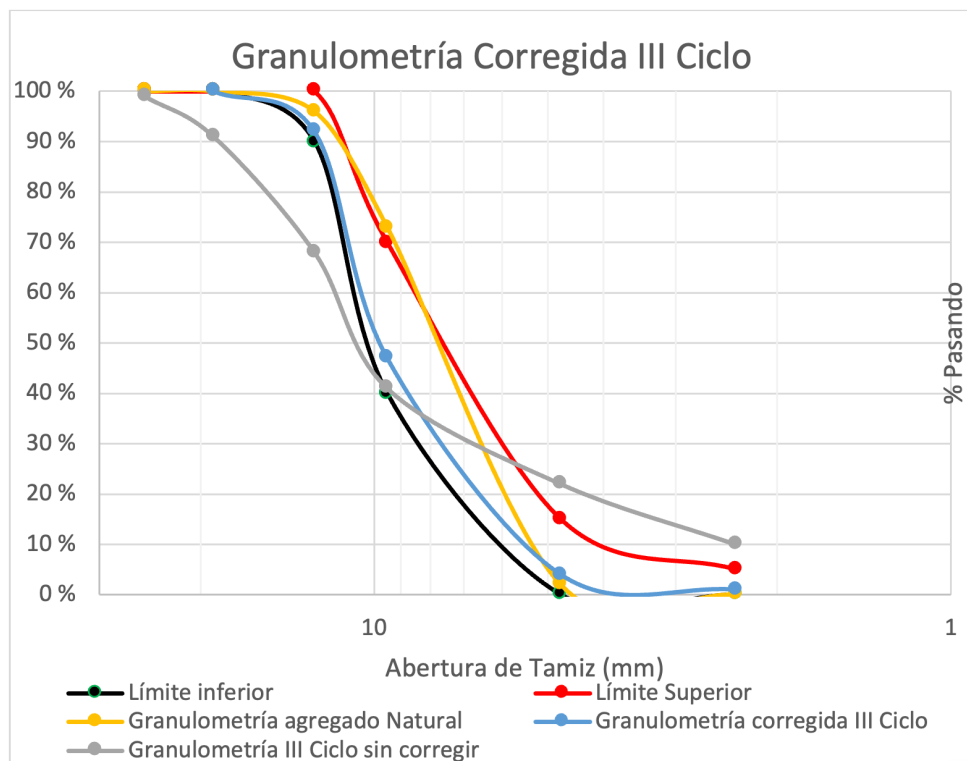


Figura 3. Gráfico de granulometría corregida del III Ciclo de reciclaje

Con los ensayos de caracterización de los agregados se llegó a resultados importantes de rescatar, como por ejemplo en los porcentajes de absorción, que ya se esperaba que fueran mayores al del agregado natural debido a la amalgama de cemento y agregados del material de base según lo expuesto por Cruz y Ramírez (2022); además, con cada ciclo de reciclaje este porcentaje de absorción aumenta, al igual que el desgaste. Por otro lado,

la gravedad específica va disminuyendo conforme se pasa a otro ciclo adicional y la densidad masiva también. En la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 se presentan los principales resultados de estas propiedades de los agregados reciclados y se pueden comparar con el patrón natural, algunos de estos resultados ya habían sido presentados de forma preliminar en un congreso (Rodríguez y Cruz; 2023).

Tabla 1. Datos de ensayos realizadas a los agregados gruesos

Material	Gravedad específica			Absorción (%)
	Gs	Gbs	Gbss	
Natural	2.74	2.63	2.67	1.6
Reciclado I Ciclo	2.69	2.22	2.39	8.0
Reciclado II Ciclo	2.69	2.09	2.32	10.6
Reciclado III Ciclo	2.69	2.06	2.30	11.3

Nota: gravedad específica (densidad relativa) seca (Gbs), gravedad específica (densidad relativa) saturada seca (Gbss), gravedad específica (densidad relativa) aparente (Gs).

Tabla 2. Densidad masiva y razón de vacíos del agregado grueso

Material	Densidad masiva envarillado		Razón de vacíos envarillado	
	Promedio (Kg/m ³)	Desv. Estándar	Promedio (%)	Desv. Estándar
Natural	1490	3.25	43	0.14
Reciclado I Ciclo	1240	1.51	44	0.07
Reciclado II Ciclo	1150	2.36	45	0.11
Reciclado III Ciclo	1150	1.30	44	0.06

Tabla 3. Desgaste del agregado grueso, utilizando la Máquina de Los Ángeles

Material	Tipo de Abrasión	Tamaño máximo nominal	Desgaste (%)
Natural	B	19.0 mm	26%
Reciclado I Ciclo	B	19.0 mm	44%
Reciclado II Ciclo	B	19.0 mm	49%
Reciclado III Ciclo	B	19.0 mm	67%

Con respecto a la densidad masiva envarillada para los agregados reciclados en comparación con el agregado natural se observó la tendencia de obtener agregado cada vez más ligeros, para el I ciclo de reciclaje se redujo en un 17% y un 23% para el II y III ciclo, lo cual era un resultado esperado debido a que las partículas de cemento que quedan adheridas después de quebrar el material poseen menores densidades. Por otra parte, con respecto al ensayo de abrasión, según INTE C64 (ASTM C131) (INTECO, 2022d) los agregados que se utilizan para concretos no deben superar el 50% de desgaste, de los ensayos realizados se obtuvo resultados del 44%, 49% y 67%, respectivamente para el I ciclo, II ciclo y III ciclo de reciclaje y para el caso de la muestra patrón el desgaste fue de solo del 26%. Cabe destacar que a partir del último ciclo de estudio ya no se cumplió con lo estipulado con la norma, por lo que este factor se debe considerar para no ver afectaciones en la durabilidad del concreto que se produzca.

También se detectó que con cada ciclo la presencia de material fino y muy fino aumentaba, lo que evidencia que el material reciclado se vuelve cada vez más quebradizo y con porcentajes de finos que pueden interferir en la calidad del concreto, por lo que se considera pertinente retirarlos del material a utilizar.

3.2. Factibilidad técnica del uso de agregados reciclados para fabricación de nuevos concretos

Se utilizaron los parámetros del agregado natural y del reciclado en cada combinación según corresponde para realizar los ensayos en mezclas de concreto. Cabe rescatar que debido a las altas absorciones de los agregados reciclados se tuvieron que realizar correcciones por humedad y absorción en todos los diseños. Esto concuerda con los resultados y las recomendaciones de la literatura (Caycho y Espinoza (2009); Cruz y Ramírez (2022); Zega y Di Maio (2007); Gutiérrez et al. (2015)) que indican que parte del agua de la mezcla debe agregarse primero para que haya una humectación de los agregados reciclados antes de que estos entren en contacto con el cemento, para así evitar pérdidas del agua que se requiere para la hidratación. La experimentación concluye que efectivamente los diseños de mezcla con agregado reciclado requieren un aumento de la relación agua/cemento en cada nuevo ciclo de reciclado. Estas correcciones son importantes ya que permiten dosificar la cantidad de agua adicional que se le debe agregar a la mezcla para que logre alcanzar la condición de superficie saturada seca y no consuma el agua de diseño necesaria para que se dé la reacción con el cemento o en caso contrario el agua libre presente en el agregado se dosifique y no afecte de tal forma en el diseño y la resistencia esperada.

La Tabla 4 muestra el comportamiento de los parámetros del concreto fresco que más variaron con los ciclos. Se debe anotar que la temperatura y el contenido de aire casi no presentaron variaciones significativas.

Tabla 4. Resultados de ensayos al concreto fresco

Combinación	No. Ciclo	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	A/C	Densidad masiva (Kg/cm ³)	Contenido de Aire (%)
100% Natural	Patrón	65	24.1	0.53	2312	1.8
30% Reciclado 70% Natural	1	95	23.3	0.56	2286	1.7
50% Reciclado 50% Natural		85	23.8	0.58	2243	1.5
100% Reciclado		75	24.6	0.53	2209	1.8
30% Reciclado 70% Natural	2	100	25.4	0.61	2263	1.6
50% Reciclado 50% Natural		90	24.7	0.61	2226	1.7
100% Reciclado		100	24.7	0.61	2197	1.5
30% Reciclado 70% Natural	3	95	24.3	0.64	2249	1.7
50% Reciclado 50% Natural		95	23.1	0.63	2237	1.7
100% Reciclado		100	25.4	0.65	2175	1.7

Con las dosificaciones preparadas se procedió a realizar los especímenes, los cuales correspondieron a 17, 14 y 10 unidades, respectivamente para el I, II y III Ciclo, debido a las pérdidas de material, pues cabe destacar que conforme se avanzó en número de ciclo se reduce la cantidad de la muestra, esto debido a que el propósito de la investigación es únicamente utilizar el material reciclado del ciclo anterior sin agregar material, por lo que al triturar el material en cada periodo siguiente se obtuvo menor cantidad de este, debido a la generación de material fino a eliminar por cada ciclo de reciclaje. Otro punto importante a destacar fue que se modificó el orden del procedimiento descrito (INTECO, 2022b), la modificación consistió en cómo se agregaron los materiales, donde se agregó primeramente el 60% del agua durante el primer minuto en conjunto con los agregados, de manera tal que el agregado reciclado pudiera absorber agua y alcanzar su condición de superficie saturada, al minuto siguiente se adicionó el cemento y se mezcló por dos minutos más, posterior a esto se dejó reposar los tres minutos y en los dos minutos restantes se le añadió el 40% del agua restante. Esta técnica fue utilizada por Cruz y Ramírez (2022) y anteriormente también se utilizó en una tesis de grado disponible solamente en físico en la Universidad de Costa Rica (Poveda (2008) y entre sus ventajas se encuentra la disminución de la abrasión del agregado reciclado y reducción en la generación de polvo.

En cuanto a la resistencia de los concretos con agregados reciclados, en general todos los especímenes fallados alcanzaron valores aceptables para la edad de falla correspondiente. En la Figura 4 se muestra una síntesis de los resultados de resistencia para 7, 14 y 28 días, por ciclo de falla. Durante la investigación se observó un fenómeno durante el II ciclo de reciclaje, debido a un incremento sustancial en la resistencia de falla a los 28 días, por lo que se consideró pertinente medir hasta que resistencia se podría alcanzar al cumplir los 56 días, por lo que se separaron dos especímenes del II ciclo en cada una de las 3 combinaciones y se resguardaron para ser fallados al cumplir dicho plazo, que según la teoría se requiere para obtener su resistencia máxima. En estos casos se observaron resistencias de hasta 37MPa , valores de resistencia muy favorables que representan un muy buen comportamiento del agregado reciclado en cuando a la resistencia del concreto, sobre todo la combinación de 50% R 50% N que fue la que obtuvo el valor más alto. Debido a que esta parte correspondió a una decisión adicional de experimentación no se contó con un patrón de comparación ni se realizó para los otros ciclos de reciclaje.

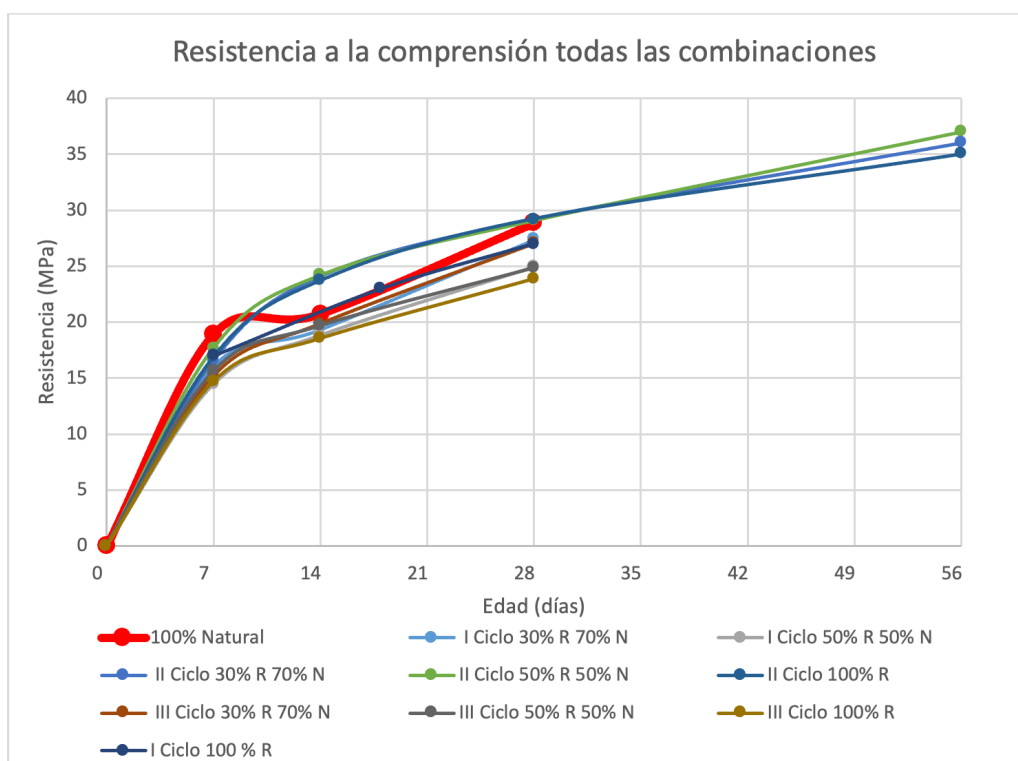


Figura 4. Resistencia a la compresión de todas las combinaciones en los diferentes ciclos de reciclaje.

Tabla 5. Resistencia a la compresión de todas las combinaciones de ciclos de reciclaje

No. Ensayo	Combinación	Resistencia promedio 7 días	Desviación estándar	Diferencia al patrón (%)	Resistencia promedio 14 días	Desviación estándar	Diferencia al patrón (%)	Resistencia promedio 28 días	Desviación estándar	Diferencia al patrón (%)
		(Mpa)	(Mpa)		(Mpa)	(Mpa)		(Mpa)	(Mpa)	
1	100% Natural	18.9	0.2	0	20.7	0.6	0	28.8	1.9	0
1	30% Reciclado 70% Natural	16.0	1.1	15	19.3	1.0	7	27.4	2.7	5
1	50% Reciclado 50% Natural	14.5	0.8	24	18.8	2.5	9	24.9	1.8	14
1	100% Reciclado	16.5	1.0	13	22.8	0.5	-10	26.5	2.1	8
2	30% Reciclado 70% Natural	16.6	1.0	12	24.1	2.4	-16	29.2	1.4	-1
2	50% Reciclado 50% Natural	17.7	12.3	6	24.2	1.3	-17	29.1	3.7	-1
2	100% Reciclado	16.9	4.9	11	23.7	5.9	-14	29.2	1.6	-1
3	30% Reciclado 70% Natural	15.2	0.3	20	19.9	5.9	4	27.0	0.3	6
3	50% Reciclado 50% Natural	15.6	0.4	17	20.0	0.1	5	24.9	2.0	14
3	100% Reciclado	14.7	0.2	22	18.6	0.7	11	23.9	0.4	17

Si se comparan los resultados obtenidos con el patrón se puede observar que en algunos de los casos la magnitud de la resistencia es mayor para los cilindros de los concretos con algún porcentaje de agregado reciclado, en especial cuando se trabaja con 100% de agregado reciclado. Esto se puede deber a que el cemento que se tiene inmerso en el conglomerado agregado - cemento en su primer ciclo contribuye a un alza en la resistencia total del concreto, debido a que puede suceder que algunas de las partículas de cemento aún estén contribuyendo al fraguado cuando son procesadas nuevamente para realizar las pruebas de la corrida siguiente, debido a la poca edad que tiene el concreto al utilizarse para procesar nuevamente los agregados reciclados; por ello este comportamiento en especial se evidenció durante la segunda y tercera molida de concreto, debido a que apenas se finalizó la falla de ciclo anterior se procedió a repetir los procesos para los otros ciclos sin que el cemento haya reaccionado en su totalidad con el agua de la mezcla. Según se vio en el laboratorio y comentaron algunos técnicos es altamente posible que algunas partículas de cemento del ciclo anterior aún podrían estar contribuyendo en resistencia en los ciclos posteriores. Comparando los resultados de resistencia de los diferentes ciclos entre sí se observó una ligera baja del tercero con respecto al segundo ciclo de reciclado, este comportamiento puede estar asociado a que parte de la resistencia es aportada por el agregado grueso y a pesar de contener mayor cantidad de cemento en cada ciclo se tiene un volumen menor de agregado grueso virgen y el agregado reciclado mostró ser un material más quebradizo.

Adicionalmente, se realizó un análisis de varianza ANOVA. Este método de estadística inferencial busca determinar de donde viene la variabilidad de un conjunto de los datos. La hipótesis planteada para la prueba ANOVA es si la variabilidad de los resultados obtenidos para la resistencia de los concretos puede deberse a los ciclos de reciclaje a los que habían sido sometido los agregados o no. Esto se realizó con ayuda de una prueba de distribución de varianza F, en donde para el análisis ANOVA la región de rechazo se va a encontrar a la derecha del nivel de confianza que se utiliza para la prueba, en esta ocasión se tomó un 95% de confianza. Se determinaron todos los valores siguiendo lo que indica la prueba estadística y se encontró en todos los casos que el valor del estadístico de prueba F es mayor al F crítico, por lo que se determinó que se está en la región de rechazo, por lo que se rechazó la hipótesis nula que dice que las medias de al menos dos tratamientos son

iguales, y se aceptó la hipótesis alternativa de que al menos un par de medias son distintas. Con base en ello se puede asegurar, con un 99% de confianza que, para todos los ciclos de reciclaje, por lo que existe evidencia estadísticamente representativa de que existe una afectación de la resistencia de los cilindros conforme se avanza en ciclos de reciclaje. Para este ensayo se trabajó con un diseño no balanceado debido a que los tratamientos, los ciclos de reciclaje, son diferente al número de muestra, la cantidad de cilindros fallados; sin embargo, esto no presenta ninguna afectación en los resultados de la prueba.

Finalmente, como parte de los análisis de la factibilidad de uso de estos materiales reciclados en la fabricación de concreto se estudió si existía alguna problemática asociada a la reactividad de la sílice presente en las mezclas, producto de la presencia de cemento endurecido en el agregado reciclado; esto se trabajó mediante la prueba de Alkali Agregado. En este sentido, respecto a la reacción álcali – agregado los resultados evidencian un problema importante fuera de los estándares permitidos, ya que se evidenciaron problemas de alta expansión en las barras de prueba, situación que empeoraba con cada ciclo de reciclaje. Se presentaron valores a los 3 días del 3% de expansión en adelante, por lo que ninguno de los especímenes de ensayo logró cumplir con lo estipulado en la norma correspondiente (INTE C167:2022 (ASTM C1260)) (INTECO, 2022e). En todos los casos se obtuvo valores muy superiores, que llaman la atención a la necesidad de estudiar más a fondo la posible reactividad y su origen en estos casos; dado que la reacción álcali-agregado puede ser influida por distintos factores como: composición mineralógica de los agregados, agregados reactivos, tipo y calidad de álcalis presentes en el cemento, tiempo, humedad, entre otras (Falcone, 2013). Por tanto, los resultados llaman a pensar que un punto crítico para decidir la factibilidad integral del uso de este tipo de agregados reciclados, y sobre todo para cuando se usen varios ciclos de reciclaje, está en la influencia que se pueda tener en la durabilidad del concreto, en particular si los usos posteriores de ese concreto lo van a exponer a intemperismo o condiciones agresivas ambientales que puedan aumentar la sensibilidad de la mezcla al fisurado. En este sentido se recomienda estudiar más este fenómeno debido a que se evidencia una reacción fuerte de álcali, la cual va incrementándose a como se van desarrollando los ciclos de reciclaje. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 3. Valores de expansión porcentual debido a reacción Álcali-Sílice

Edad (días)		3	7	10	14
Nº. Ciclo	Especimen	Controles de expansión (%)			
		#1	#2	#3	#4
I Ciclo	5	-4.71	-3.08	-4.60	-6.45
	6	-3.38	-4.09	-6.39	-7.93
	7	-3.86	-3.88	-6.07	-6.90
	8	-3.65	-2.79	-4.26	-6.03
II Ciclo	9	-4.42	-5.44	-8.37	-9.30
	10	-5.81	-7.28	-10.47	-12.01
	11	-2.49	-6.46	-10.35	-11.11
	12	-2.26	-3.83	-5.83	-8.64
III Ciclo	1	-5.83	-12.31	-24.48	-47.26
	2	-6.14	-14.76	-31.74	-
	3	-4.70	-13.10	-24.49	-45.32
	4	-4.72	-12.81	-21.03	-40.91

En síntesis, los resultados obtenidos con esta investigación dan una primera aproximación importante a los cambios que sufren los materiales tras ciclos de reciclado, y como se puede apreciar casi la mitad de las propiedades físicas de los agregados evidenciaron generar una afectación

en el concreto nuevo, situación que debe llamar la atención y detonar la necesidad de ahondar más en estudios de dichas propiedades y sus implicaciones para el reciclaje. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los principales hallazgos:

Tabla 4. Resumen de consideraciones y afectaciones del uso de agregado grueso reciclado en varios ciclos para producción de concreto

Ensayo	¿Afectación?	Observaciones
Granulometría	Sí	En todos los casos se debe armar la granulometría según alguna graduación de ASTM C33
Gravedad específica y absorción	Sí	La GE tiende a disminuir conforme avanzamos en ciclos de reciclaje, las absorciones son altas, considerar para diseño de mezcla
Densidad masiva y razón de vacíos	No	La densidad masiva tiende a bajar según se avanza en ciclos, mas no afecta para el diseño
Resistencia a la abrasión	Sí	A partir el III ciclo se supera el 50% de desgaste por lo que se debe considerar para la durabilidad del concreto
Diseño de mezcla	Sí	Importante considerar absorción y humedad de agregados para el agua de diseño
Asentamiento	No	No hay evidencia de alteraciones en el asentamiento por la utilización de agregados reciclados
Temperatura	No	No hay evidencia de afectación de la temperatura por la utilización de agregados reciclados
Relación agua-cemento	Sí	Tiende a aumentar la relación A/C conforme se avanza en los ciclos de reciclaje
Densidad masiva del concreto fresco	No	Tienden a ser más ligeros entre más proporción de agregado grueso contenga y más se avance en ciclos, mas no afecta para su utilización.
Contenido de aire	No	No hay evidencia de que la utilización del agregado reciclado afecte en el contenido de aire de las mezclas de concreto
Álcali-Agregado	Sí	Existe la presencia de la reacción de álcali-agregado por lo que es importante considerarlo por efectos de durabilidad de las mezclas
Resistencia a la compresión	No	Todos superaron el f'_c nominal propuesto

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación logró concluir que existe factibilidad técnica para la utilización de escombros para la obtención de agregado grueso en al menos tres ciclos de reciclaje, con algunas restricciones en cuanto al uso de los concretos por temas de cantidad de finos, abrasión, y reacción de alcalinidad. Esto representa un potencial importante de aprovechamiento y de inclusión de una economía circular en el manejo de escombros en el país. Se obtuvo resultados favorables de caracterización de los materiales, a pesar de que los valores van siendo menos favorables conforme se avanza en los ciclos de reciclaje, que en su mayoría se encuentran dentro de los rangos permitidos. En este sentido se determinó satisfactoriamente que a pesar de que los agregados gruesos reciclados tienen diferencias importantes en casi todas sus características mecánicas y físicas, si se realizan los diseños de mezcla adecuados y los ajustes del proceso de producción, estos no influyen notoriamente en la resistencia alcanzada de los nuevos concretos.

Resalta la importancia de realizar los ensayos de laboratorio concernientes para determinar las características de los agregados obtenidos de cada fuente de escombros, para así considerar esas variaciones en los diseños de nuevas mezclas de concreto. Particularmente, es importante para toda mezcla de agregado reciclado tomar en cuenta la absorción del material y la cantidad de humedad que poseen, ya que los resultados evidenciaron que estos dos factores pueden influir significativamente en el agua de diseño y por ende en la resistencia que se vaya a alcanzar. Los resultados de esta investigación demuestran que conforme se avanza en los ciclos de reciclaje se aumenta significativamente la absorción del material.

Referente a los ensayos del concreto fresco en los tres ciclos de reciclaje se obtuvo resultados favorables, el asentamiento no se vio afectado en ninguno de los ensayos realizados, por lo que la trabajabilidad de concretos con agregado reciclado es muy similar a la que se obtiene con concretos normales. A su vez no hay evidencia tampoco de que se afecte la temperatura del concreto, debido en que en todas las muestras la temperatura se mantuvo dentro de los rangos normales. La densidad del concreto si tiende a disminuir ligeramente para proporciones donde se tiene mayor cantidad de agregado reciclado. La relación A/C si presentó un incremento entre los ciclos de reciclaje, ya que, a mayor cantidad de ciclos, mayor la cantidad de agua que necesitó la mezcla.

El único inconveniente detectado durante la investigación fue la potencial reacción de álcali que evidenció problemas de sobre agrietamiento de los concretos con agregados reciclados. En este sentido la experimentación realizada no es suficiente para concluir certeramente sobre dicho efecto, por lo que se requiere mayor investigación sobre el tema para poder determinar los factores que influyen en la reacción álcali para concretos con agregados reciclados conforme avanzan los ciclos de reciclaje.

Finalmente, se evidenció la necesidad de ampliar la investigación y reglamentación sobre las normas técnicas que se deben aplicar para comprobar la calidad e idoneidad de los agregados reciclados, pues es un tema poco investigado en Costa Rica y en el mundo. Estas normas son claves si se quiere la implementación de estas fuentes secundarias.

AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo a la investigación que realizó el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, pues facilitó los materiales y los equipos requeridos para los ensayos realizados; así como el espacio y asesoría del personal técnico destacado en cada laboratorio.

REFERENCIAS

- Armando, R. A. (2014). *Efectos de los agregado de concreto reciclado en la resistencia a la compresión sobre el concreto de $f'c= 210 \text{ Kg/cm}^2$* . Cajamarca, Perú: Tesis para optar por el Título de Profesional en Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/493>
- Bolaños, S. (2021). *Identificación, cuantificación y caracterización de residuos de construcción para sistemas constructivos modulares de viviendas en serie*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica] <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/89ed25acc32-40a3-a9ab-d36997996397>
- Calvante, C. F., Barreto, E. C. y Duarte, A. (2011). *Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero*. Merida, México: Universidad Autónoma de Yucatán. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46718150003>
- Castro, J. (2019). *Cuantificación y caracterización de los residuos sólidos de construcción para viviendas unifamiliares de gran tamaño del Gran Área Metropolitana* [Tesis de Licenciatura Universidad de Costa Rica]. Repositorio SIBDI-UCR. // repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/13433

- Caycho Hidalgo, T. E., & Espinoza Rodríguez, D. (2019). *Mezcla de concreto con agregado grueso reciclado usando cemento Portland tipo HS para cimentaciones, distrito La Molina, año 2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Universidad Ricardo Palma. <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/782c7ae0-2f72-4456-bd47-0a3820121ce3>
- Cruz, N. y Ramirez, D. (2022). Evaluación de muestras del agregado grueso proveniente de reusados de concreto para producir nuevos concretos. *Revista Métodos y Materiales, Volumen 12*. <https://doi.org/10.15517/mym.v12i0.48029>
- Falcone, D. D. (2013). *Antecedentes y Metodología de ensayo para evaluar la reacción álcali-sílice*. Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Gutiérrez Moreno, J. M., Mungaray Moctezuma, A., y Hallack Alegría, M. (2015). Reuse of Hydraulic Concrete Waste as a New Material in Construction Procedures: a Sustainable Alternative in Northwest Mexico. *Revista De La Construcción. Journal of Construction*, 14(2), 51–57. Retrieved from <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/RDLC/article/view/13312>
- Hincapié, H. Á. y Aguja, L. E. (2003). *Agregado reciclado para morteros*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.
- INTECO. (2016). *INTE C68:2016. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. Método de ensayo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC682016>
- INTECO. (2018). *INTE C72:2018. Método para determinar la densidad (densidad masiva), rendimiento y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC722018>
- INTECO. (2020a). *INTE C41:2020. Asentamiento en el concreto del cemento hidráulico: método de ensayo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC412020>
- INTECO. (2020b). *INTE C46:2020. Análisis granulométrico en tamices de agregado fino y grueso: método de ensayo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC462020>
- INTECO. (2020c). *INTE C62:2020. Norma para reducir muestras de agregado a tamaño de ensayo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC622020>
- INTECO. (2022a). *INTE C18:2022. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC182022>
- INTECO. (2022b). *INTE C39:2022/COR 1:2023. Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto: método de ensayo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC392022COR12023>
- INTECO. (2022c). *INTE C64:2022. Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso pequeño, utilizando la máquina de Los Ángeles: método de ensayo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC642022>
- INTECO. (2025a). *INTE C19:2025. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en el campo*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC192025>
- INTECO. (2025b). *INTE C58:2025. Método de ensayo para determinar la densidad masiva (densidad masiva) y los vacíos en el agregado*. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). <https://inteco.org/tienda/catalogo/INTEC582025>
- Jordan, S. J., & y Viera, C. N. (2014). *Estudio de la resistencia del concreto utilizando como agregado el concreto reciclado de obra. Nuevo Chimbote, Perú: Tesis para optar por el Título Profesional de Ingeniero Civil, Universidad Nacional del Santa*.
- Marín, F. (2021). *Caracterización y cuantificación de residuos sólidos de construcción para viviendas individuales tipo apartamento en condominio con sistema constructivo modular tipo Armablock en la Gran Área Metropolitana*. Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/bbc5d82a-9239-4b82-8533-7572778601d/full>

- Poveda, M. (2008). Evaluación de la prefactibilidad técnica y financiera de reutilizar los residuos de construcción como agregados para concreto. *Proyecto Final de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica*.
- Remolina, J. G. (2018). *Determinación de parámetros físico-mecánicos y de durabilidad en concreto reciclado con residuos de construcción y demolición*. Barranquilla - Atlántico: Universidad de la Costa - CUC.
- Rímolo, S. (2021). *Identificación, categorización y cuantificación de residuos de construcción en viviendas de mampostería confinada*. Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/39672e68-4653-405b-82d0-acae126c381d/full>
- Rodrich, G. S. y Silva, O. J. (2018). *Influencia del agregado de concreto reciclado sobre las propiedades mecánicas en un concreto convencional*. Trujillo, Perú: Universidad Privada del Norte.
- Rodríguez, J.L y Cruz, N. (2023). Análisis de la factibilidad técnica del reciclaje cíclico de escombros para la producción de agregados gruesos para la construcción. Memorias del 10° Congreso Interamericano de Residuos Sólidos DIRSA / AIDIS. México. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/60cd0342-92ad-482d-b6bb-4b169fb8139d>
- UICN. (2011). *Guía de manejo de escombros y otros residuos de la construcción*. https://construccionsostenible.cfia.or.cr/wp-content/uploads/2018/08/guia_escombros_baja.pdf
- Zega, C.J, y Di Maio, A.A. (2007). Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigon. *Boletín Técnico*, 45(2), 1-11. Recuperado en 04 de noviembre de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2007000200001&lng=es&tlng=es.