



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

métodos &
materiales

Publicación Anual • Volumen 12 • Diciembre 2022 • ISSN electrónico: 2215-4558

Evaluación de muestras del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos

Evaluation of samples of the coarse aggregate from concrete wates to produce new concrete

Nidia Cruz Zúñiga

Docente Asociada, Escuela de Ingeniería Civil,
Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica.
nidia.cruz@ucr.ac.cr

Daniela Ramírez Picado

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
daniela.r96@hotmail.com

Fecha de recepción: 9 agosto 2021 / Fecha de aprobación: 18 enero 2022

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 de muestras del agregado grueso proveniente de residuos de concreto para producir nuevos concretos

Evaluation of samples of the coarse aggregate from concrete wastes to produce new concrete

Nidia Cruz Zúñiga

Docente Asociada, Escuela de Ingeniería Civil,
Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica.
nidia.cruz@ucr.ac.cr

Daniela Ramírez Picado

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
daniela.r96@hotmail.com

Fecha de recepción: 9 agosto 2021 / Fecha de aprobación: 18 enero 2022

RESUMEN

Las demandas de materiales de construcción son cada vez más crecientes, sus fuentes escasas y el manejo de residuos de construcción y demolición muy complejo. La investigación que sustentó el presente artículo buscó estudiar las características del agregado grueso para la construcción proveniente de escombros de obras civiles, y compararlas con los agregados vírgenes tradicionales, con el fin de valorar su posible utilización. Se trabajó con tres fuentes de materia prima para reciclar: paredes de mampostería, baldosas prefabricadas y concreto colado en sitio (cilindros de prueba); todos facilitados por el LanammeUCR. Se siguieron las normas establecidas por INTECO, tanto para la caracterización de los agregados reciclados como para los diseños de mezcla. En las mezclas se utilizaron tres diferentes porcentajes de agregado grueso reciclado sustituyendo al natural. Los resultados arrojaron pequeñas variaciones respecto al comportamiento del agregado virgen, en especial en la absorción, peso unitario y desgaste. Se obtuvieron resultados muy favorables en cuanto a la resistencia a la compresión de los concretos con agregado grueso reciclado, contemplando siempre un diseño de mezcla que se ajustara a sus características. Entre las limitaciones está que no se estudió la durabilidad del concreto fabricado; tampoco se trabajó con agregado fino reciclado; ambos fenómenos serán abordados en futuras investigaciones. Al finalizar la investigación se concluye que el reciclaje de agregado grueso es técnicamente factible.

Palabras clave: Residuos de construcción, reciclaje de agregados, concretos sostenibles, caracterización de agregados reciclados, concreto reciclado.

ABSTRACT

The demands for construction materials are increasing, their sources are scarce and the management of construction and demolition waste is very complex. The research that supported this article sought to study the characteristics of coarse aggregate for construction from civil Works waste, and compare them with traditional virgin aggregates, in order to assess their possible use. We worked with three sources of raw material for recycling: masonry walls, precast tiles, and cast-in-place concrete (test cylinders); all facilitated by the LanammeUCR. The standards established by INTECO were followed, both for the characterization of the recycled aggregates and for the mix designs. Three different percentages of recycled coarse aggregate were used in the mixtures, substituting the natural one. The results showed small variations regarding the behavior of the virgin aggregate, especially in absorption, unit weight and wear. Very favorable results were obtained in terms of the compressive strength of the concretes with recycled coarse aggregate, always contemplating a mix design that adjusted to its characteristics. Among the limitations is that the durability of manufactured concrete was not studied; recycled fine aggregate was not used either. Both phenomena will be addressed in future research. At the end of the investigation, it is concluded that the recycling of coarse aggregate is technically feasible.

Keywords: Construction waste, aggregate recycling, sustainable concrete, characterization of recycled aggregates, recycled concrete.

1. INTRODUCCIÓN

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) enmarcan el rumbo de la construcción hacia un fin más sustentable, donde el aprovechamiento de residuos, la disminución de impactos de los procesos de producción y la disminución de la afectación al ambiente son trascendentales. La presente investigación nace de la necesidad de contar con datos técnicos que soporten y respalden el potencial uso de residuos de construcción tipo escombros para su aprovechamiento mediante el procesamiento y readecuación de agregados reciclados. Los residuos de concreto generados al demoler una estructura da como resultado grandes cantidades de residuos que en la actualidad no son tratados y cuya disposición final se ve limitada a un relleno sanitario u otro sitio, donde únicamente son apilados. Aunado a lo anterior se tiene mucha presión por la explotación de fuentes naturales vírgenes para obtener los agregados para nuevas obras.

El objetivo de la investigación fue caracterizar el agregado proveniente de residuos de concretos de obras civiles de tres diferentes fuentes: muros de mampostería, concreto colado en sitio y elementos prefabricados, para producir agregados que puedan ser reutilizado en nuevos concretos. Para alcanzar esto se plantearon objetivos específicos que buscaban determinar las diferentes características físicas de los agregados provenientes de dichos residuos de obras civiles y compararlas con una muestra patrón de agregado natural, para finalmente evaluar la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto utilizando un 30%, 50% y 100 % de agregado grueso reciclado. Esta investigación aporta los resultados de los ensayos al material granular que se generó de triturar escombros de las tres fuentes de residuos, que fueron brindados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR).

2. ANTECEDENTES

La industria de la construcción está asociada a un elevado consumo de materias primas, destacando los agregados gruesos y finos, los cuales junto con la pasta cementicia constituyen el concreto. En Costa Rica el concreto es uno de los materiales más importantes para la construcción, ya que se utiliza para cimientos, piso, paredes, carreteras, puentes, entre otros (Abarca y Leandro, 2016). Según UNEP (2011) el sector construcción genera cerca del 40% del volumen de residuos sólidos producidos en el mundo. El mayor volumen de estos residuos corresponde a escombros, los cuales tienen como destino final autorizado en el país solo los rellenos

sanitarios y en pocos proyectos particulares las escombreras. Los rellenos no son diseñados para disponer de este tipo de residuos no tradicionales, lo que significa un uso ineficiente de la inversión realizada para su construcción y habilitación, debido a que se estaría colocando material inerte y de gran volumen en celdas que fueron diseñadas para tratar residuos putrescibles y que por ende cuentan con sistemas para el drenaje de subproductos como los lixiviados y los gases, que no se producen con los escombros. Peor aún, existen residuos de construcción que son abandonados en espacios públicos, carreteras, lotes baldíos, ríos, entre otros, generando un alto impacto ambiental. (Castro, 2019).

En Costa Rica no se han realizado pruebas suficientes que determinen las características de los agregados reciclados provenientes de escombros. Según la bibliografía revisada a la fecha de la investigación se contaba únicamente con la caracterización de agregado que resulta de la trituración de bloques de mampostería (Poveda, 2008). Este mismo autor describe el escombro triturado como agregado natural recubierto con mortero adherido con una textura más irregular y angulosa que el agregado natural. Además, presenta menor densidad, mayor absorción y menor resistencia que los agregados naturales.

A nivel internacional el reciclaje de concreto ha sido estudiado de forma más amplia. Alonso et al. (2015) hace una revisión acerca del reciclaje de concreto en el mundo, donde Europa encabeza la lista con países como Holanda, Bélgica y Dinamarca que reciclan alrededor del 90% del concreto debido a la escasez de agregado natural. Le siguen Finlandia, Austria y Reino Unido, con porcentajes de reciclaje entre 40% y 70%, en estos países el elevado costo impuesto sobre el vertido de escombros son el principal motivo de su reutilización. A nivel de América, países como Estados Unidos, Colombia, México y Brasil han optado por la utilización de agregado reciclado, pero a una menor escala.

Varios autores Hallack et al. (2015), Di Maio y Zega (2007), Caycho y Espinoza (2009) han investigado el comportamiento de mezclas de concreto que utilizan cierto porcentaje de materiales reciclados, llegando a conclusiones semejantes en cuando a las resistencias alcanzadas, los cambios en la capacidad de absorción de agua y de desgaste del agregado, sin embargo no siempre se han considerado todos esos aspectos a la hora de determinar los diseños de mezcla para los concretos con agregados reciclados.

Las propiedades del concreto varían según las características físicas de los agregados que se utilizan, las principales son la forma, textura, angularidad o esbeltez, granulometría,

densidad masiva y contenido de vacíos, gravedad específica, absorción y humedad superficial, abrasión y contenido de humedad al momento de la dosificación. A medida que se establece la influencia de esas características en el concreto resulta más fácil conseguir mezclas a menores precios sin sacrificar resistencia y durabilidad (León y Ramírez, 2010).

Los escombros tienen potencial para ser utilizados como agregados reciclados en tanto se garantice la calidad de los mismos. Uno de los aspectos fundamentales es conocer la fuente de los escombros y definir si provienen de una demolición o son residuos de nuevas construcciones. Esta caracterización preliminar permitiría dar un indicio de la calidad del concreto y sus posibles usos (Cruz, 2015).

3. MÉTODOS Y MATERIALES

El abordaje metodológico parte de una aproximación teórica al problema planteado, para ello se indaga sobre las investigaciones realizadas hasta el momento y la normativa existente tanto a nivel nacional como internacional. Como parte del análisis se estudiaron las reglamentaciones nacionales referentes a manejo y aprovechamiento de residuos. Además, se buscaron normativas internacionales de países referentes como Brasil, México, Unión Europea, especialmente en España; esto con el fin de conocer opciones de tratamiento y de reutilización de escombros que pudieran ser utilizados en el país. En este sentido es relevante ver como países que logran altos índices de aprovechamiento de escombros, cuentan con suficiente normativa que regule y apoye esta práctica, como el caso de Brasil.

En una segunda fase se procede con la preparación de los materiales en el laboratorio. Primeramente, se trituró el concreto para obtener el agregado reciclado. A los muros de mampostería y las baldosas prefabricadas se les disminuyó su tamaño con un rotamartillo y un mazo, al mismo tiempo se les retiró el acero de refuerzo. Al tener los escombros de menores tamaños se trituraron de forma mecánica en el quebrador de muelas marca MASSCO. Los cilindros de concreto, al no tener acero, solamente se quebraron con un mazo para reducir su tamaño hasta que el escombros pudo ser introducido por la boca del triturador mecánico que se tenía disponible en el laboratorio. La separación máxima de las mandíbulas se mantuvo siempre en $\frac{1}{2}$ ", de esta forma se busca que las partículas tengan el tamaño máximo nominal deseado, sin embargo en fases posteriores, mediante el análisis granulométrico, se encontró la existencia de partículas con caras de más de $\frac{1}{2}$ ". Esta es una de las mayores limitantes del triturador utilizado, no garantizar que todas las caras de las partículas midan máximo $\frac{1}{2}$ ".

Posteriormente, se entró en la fase experimental, donde se evaluaron las siguientes propiedades físicas de los agregados naturales y los agregados gruesos reciclados: granulometría, gravedad específica seca (Gbs), absorción, abrasión y contenido de vacíos. Los valores de cada agregado reciclado se compararon con los resultados obtenidos del agregado grueso natural y otros resultados obtenidos de revisión bibliográfica. Se realizó un análisis granulométrico a cada una de las muestras tal cual sale del quebrador, siguiendo la INTE C46:2016 (ASTM C136:2014), al no cumplir con los requisitos granulométricos para el tamaño máximo nominal seleccionado se tamiza el material y se combinó de forma que cumpla con la granulometría requerida para elaborar concreto y se asemeje a la granulometría del agregado grueso natural (INTE C15:2014, ASTM C33). En esta investigación no se cuantificó el contenido de cemento adherido a las partículas del agregado reciclado. El agregado fino natural se caracterizó mediante el análisis granulométrico, la determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción; este material fino fue el que se utilizó para todos los diseños de mezcla. Además, se determinó la densidad del cemento a utilizar

Cabe destacar que todos los ensayos se realizaron a cada una de las muestras de agregado grueso proveniente de cada tipo de escombros reciclado por separado, nunca se mezclaron las fuentes. En investigaciones posteriores se puede realizar una comparación adicional al mezclar las fuentes de escombros para reciclar. También una particularidad de esta investigación fue que el material reciclado tenía una calidad bastante homogénea y limpia, al provenir todas de ensayos del LanammeUCR; se prevé que los escombros de obras civiles en general tendrían mayor cantidad de otros residuos mezclados o podrían no estar tan limpios, lo que afectaría su posterior calidad.

Con respecto al concreto fresco se analizó la trabajabilidad, temperatura, peso unitario y contenido de aire. En su estado endurecido se midió la resistencia a la compresión, mediante la falla a compresión de especímenes cilíndricos de concreto a los 7, 14 y 28 días. Es importante señalar que una de las principales limitaciones de esta investigación es que no analiza la durabilidad de los concretos elaborados con material reciclado, lo que debe ser abarcado como prioritario en una segunda investigación por medio de ensayos de absorción de agua, permeabilidad y desgaste del concreto endurecido.

Por cada fuente de agregado reciclado se realizó el mismo diseño de mezcla, pero considerando las características de cada material y luego con dicho diseño se prepararon las mezclas dos o tres veces, según la disponibilidad de material. Para cada fuente se probaron diferentes proporciones de agregado

grueso reciclado a ser combinado con agregado natural: 100%, 50% y 30%. Los resultados obtenidos se promediaron para cada juego de combinación y se compararon con un diseño patrón con 100% de agregado natural. Se elaboraron en total 180 cilindros de 100 mm x 200 mm, siguiendo el procedimiento descrito en la norma INTE C18:2016 (ASTM C192). Por cada colada se realizaron 9 cilindros para fallar 3 cilindros a 7 días, 3 cilindros a 14 días y 3 cilindros a 28 días.

En esta investigación no se utilizó agregado fino reciclado, tampoco se tenía en los objetivos el caracterizar ese agregado fino reciclado, debido a la poca disponibilidad de material, lo que no permitía tener las cantidades necesarias para su caracterización. El material fino que salía de la trituración de los escombros no fue caracterizado, sin embargo, si se cuantificó en cantidad por tipo de escombros. Para las pruebas de mezcla de concreto solo se utilizó agregado fino natural proveniente del Río Chirripó. Para la elaboración de todo el concreto se utilizó cemento hidráulico Holcim Fuerte de uso general. El método utilizado para todos los diseños de mezcla es el de American Concrete Institute (ACI).

4. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

4.1. Fuentes de Agregados para Reciclar

Se utilizaron tres diferentes fuentes de escombros: baldosas prefabricadas, pared de mampostería y concreto colado en sitio (residuos de ensayos de hormigón mediante cilindros de prueba a 210 kg/cm²), todas provenientes de ensayos realizados en el LanammeUCR en el año 2020. Esto permitió que las fuentes fueran homogéneas y se pudiera garantizar la calidad de los materiales, pues sus procesos de fabricación y construcción estuvieron muy controlados. Esto puede generar un residuo de mayor calidad u homogeneidad. Para garantizar la disponibilidad de material a usar se realizó un cálculo preliminar de la cantidad de material necesaria para todos los ensayos, se trituró todo y después se cuarteo el material para tomar cada muestra.

Una vez que se obtuvo el agregado se realizó a cada material una granulometría preliminar. Para poder hacer la granulometría y garantizar la representatividad se cuarteo el material siguiendo la norma INTE C62:2020 (ASTM C702:2018) hasta obtener una muestra de 5.0 kg, cantidad necesaria para el tamaño máximo nominal de 19 mm según la norma INTE C46:2020 (ASTM C136:2019). Sin embargo, ninguna de las granulometrías preliminares cumplió con los porcentajes pasando recomendados para la elaboración de concreto según los requerimientos establecidos en la norma INTE C15:2018 (ASTM C33:2018). Adicionalmente, se obtuvieron los módulos de finura entre 6.15 y 6.39, lo que significa que el tamaño promedio de las partículas del agregado reciclado fue de 4.75 mm. Además, los porcentajes de material pasando la malla No. 200 se encontraron entre 0.93 y 4.89. Por estas razones se procede con la separación del material por tamaños utilizando la tamizadora mecánica propiedad del LanammeUCR. La serie de tamices en todos los casos se colocó con la abertura progresivamente más pequeña, se utilizaron las mallas 1", 3/4", 1/2", 3/8", No. 4 y la charola; esto con la finalidad de poder armar una granulometría que se asemejara a la distribución granulométrica del agregado natural.

En las granulometrías preliminares se obtuvo para el agregado de baldosas prefabricadas un módulo de finura de 6.25, para el agregado de pared de mampostería 6.39 y para el agregado de cilindros de concreto 6.15. Los valores de módulo de finura para el agregado grueso con tamaño máximo nominal de 19 mm varían entre 7.25 y 7.7; todos los módulos de finura dieron muy por debajo de este rango.). Por esta razón se separó y se mezclaron cantidades específicas de material de cada fuente por separado, para obtener un agregado con una distribución de partículas controlada, en este caso la granulometría que se escogió fue la No.6 descrita en la INTE C15:2018 (ASTM C33:2018) por ser la misma que tiene el agregado natural de control, en la Figura 1 se muestran los 3 materiales ya con la graduación deseada. En la Figura 2 se muestran las curvas granulométricas de los agregados reciclados con graduación corregida, el agregado natural y los límites tanto superior como inferior de la granulometría No.6.



Fuente: Baldosas prefabricadas



Fuente: Pared de mampostería



Fuente: Concreto colado en sitio

Figura 1. Agregado grueso reciclado con la granulometría deseada

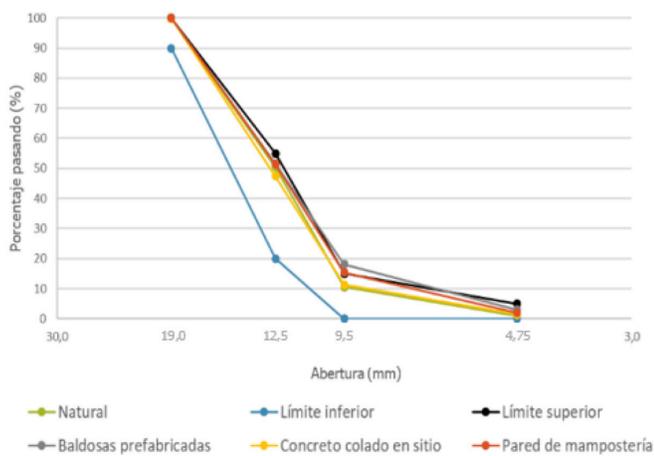


Figura 2. Curva granulométrica agregados reciclados corregidos, agregado natural y límites establecidos en la INTE C15:2018

4.2. Características de los Agregados Reciclados

Se realizaron varias pruebas de laboratorio para determinar parámetros clave de los agregados reciclados con el fin de valorar su potencial utilización para mezclas de concreto. Primeramente, se estimó la densidad relativa (gravedad específica) seca al horno (G_b), la densidad relativa (gravedad específica) superficie saturada seca (G_{bss}), la densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (G_s) y la absorción del agregado reciclado, siguiendo la norma INTE C68:2016 (ASTM C127:2015). Los resultados obtenidos en los agregados reciclados (mostrados en la Tabla 1) son muy similares entre sí, pero en comparación con el agregado natural, presentan mayor absorción y menor densidad, este comportamiento ocurre por la alta capacidad de absorción del cemento y mortero endurecido adherido a la superficie del agregado reciclado y las grietas ocasionadas durante el momento de trituración (Bazalar y Cadenillas, 2019).

Tabla 1. Densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.

Material	Gravedad específica			Absorción
	G_s	G_b	G_{bss}	
Natural	2,80	2,66	2,71	1,8
Baldosas prefabricadas	2,71	2,18	2,38	8,9
Pared de mampostería	2,70	2,19	2,38	8,8
Concreto colado en sitio	2,68	2,18	2,36	8,6

Llama la atención que el porcentaje de absorción de los agregados provenientes de mampostería tengan un valor similar al de los cilindros de concreto colado en sitio, siendo que el agregado de mampostería tiene en su matriz un agregado mucho más fino dadas sus características de fabricación.

Seguidamente, se obtuvieron el peso unitario y la razón de vacíos del agregado (ver Tabla 2), para ello se siguió el procedimiento de envarillado descrito en la norma INTE C58:2013 (ASTM C29:2009). El ensayo se repite 3 veces y se reportan los valores promedio obtenidos.

Cabe destacar las razones de vacíos de los agregados gruesos reciclados que están por encima del valor obtenido del agregado grueso natural; conforme incrementa este valor mayor será el requerimiento de pasta en el diseño de mezcla. Esta razón está asociada con la forma de las partículas y la graduación del material (Kosmatka et al, 2004).

En cuanto a la resistencia a la abrasión se sigue el procedimiento B de la norma INTE C64:2017 (ASTM C131:2014) para agregados con tamaño máximo nominal de 19 mm. Los porcentajes de desgaste de los agregados gruesos reciclados están por encima del obtenido para el agregado natural (ver Tabla 3). Al ser los agregados reciclados un material formado por un conglomerado de partículas se vuelve más susceptible al desgaste.

Es importante mencionar que los agregados gruesos reciclados ensayados de las tres diferentes fuentes no exceden el 50 % de desgaste, valor máximo recomendado en la norma INTE C64:2017 (ASTM C131:2014) para la elaboración de concreto que vayan estar expuestos a ambientes extremos.

En esta sección cabe destacar que el agregado reciclado de baldosas prefabricadas en sitio posee menor peso unitario, mayor razón de vacíos y mayor porcentaje de absorción, debido principalmente a que el tamaño máximo nominal del agregado grueso virgen es menor al utilizado en el concreto colado en sitio y la pared de mampostería, esto implica una mayor cantidad de pasta.

4.3. Características del Concreto

Para el diseño de las mezclas a ensayar se escogieron tres combinaciones:

- 30% de agregado reciclado y 70% de agregado natural,
- 50% de agregado reciclado y 50% de agregado natural,
- 100% de agregado reciclado.

Todos los diseños de mezcla se realizaron para obtener una resistencia característica a la compresión del concreto a 28 días de 210 kg/cm², esto pues se busca valorar el

Tabla 2. Peso unitario y razón de vacíos del agregado grueso.

Material	Peso Unitario Envarillado		Razón de vacíos Envarillado	
	Promedio (kg/m ³)	Desv. Estandar (kg/m ³)	Promedio (%)	Desv. Estandar (%)
Natural	1534	2,27	42	0,09
Baldosas prefabricadas	1175	5,92	50	0,25
Pared de mampostería	1205	1,56	45	0,07
Concreto colado en sitio	1224	2,65	44	0,12

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	20
Baldosas prefabricadas	B	19,0 mm	40
Pared de mampostería	B	19,0 mm	43
Concreto colado en sitio	B	19,0 mm	37

uso del agregado reciclado para concretos de los más comúnmente utilizados en las construcciones estándares del país. En futuras investigaciones se tendrían que realizar experimentaciones similares para valorar potenciales usos en concretos estructurales. En los casos estudiados no se presentaron diferencias significativas en las proporciones por peso seco, sin embargo, como se mencionó anteriormente, los agregados reciclados tienen absorciones altas, además la arena se encontraba a la intemperie, por estas razones fue necesario hacer las correcciones en el pesaje de los agregados tomando en cuenta su humedad y absorción, con estos nuevos valores se determina la proporción corregida y la dosificación por peso de cada mezcla. En la tabla 4 se muestra el detalle:

Para la elaboración del hormigón en estado fresco se siguió el procedimiento descrito en la norma INTE C18:2016 (ASTM C192), pero con una modificación en el orden en que se agregan los materiales. La modificación consiste en agregar 60% de agua en el primer minuto junto con los agregados de forma tal que el agregado reciclado pueda absorber agua y alcanzar la condición saturado a superficie seca, pasado el primer minuto se adiciona el cemento y se mezcla por dos minutos más, seguido se deja reposar por tres minutos y en los dos minutos siguientes se vuelve a mezclar y se agrega el otro 40% del agua. Otra ventaja de realizarse la mezcla de esta manera fue que se disminuye la abrasión del agregado reciclado y la generación de polvo. Poveda (2008) realizó esta misma modificación en el proceso de elaboración de las mezclas de concreto, los primeros en observar este comportamiento de absorción en las mezclas de concreto con agregado reciclado fueron Tam et al. (2005).

Tabla 4 . Dosificación utilizada en la elaboración de las mezclas de concreto

COMBINACIÓN	MUESTRA NO.	CEMENTO	ARENA	AGREGADO GRUESO NATURAL	AGREGADO GRUESO RECICLADO	AGUA/CEMENTO
100 % Natural	N3 100%	1	1,8	2,3	0,0	0,50
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B1 30% y B2 30%	1	1,9	1,6	0,5	0,48
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B3 30%	1	1,9	1,6	0,5	0,50
30% Pared de mampostería 70 % Natural.	M1 30% y M2 30%	1	1,9	1,6	0,5	0,49
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C2 30%	1	1,9	1,6	0,6	0,49
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C3 30%	1	1,8	1,6	0,6	0,51
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B1 50%	1	1,9	1,1	0,9	0,51
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B2 50%	1	1,9	1,1	0,9	0,60
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M1 50% y M2 50%	1	1,9	1,1	0,9	0,51
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C1 50%	1	1,8	1,1	0,9	0,55
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C2 50%	1	1,8	1,1	0,9	0,50
100% Baldosas prefabricadas	B1 100%	1	2,0	0,0	1,7	0,56
100% Baldosas prefabricadas	B2 100%	1	2,0	0,0	1,7	0,52
100% Pared de mampostería.	M1 100%	1	1,9	0,0	1,8	0,55
100% Pared de mampostería	M2 100%	1	1,9	0,0	1,8	0,59
100% Concreto colado en sitio	C1 100% y C2 100%	1	1,8	0,0	1,8	0,53

Malešev et al. (2014) en su investigación sobre las propiedades del concreto con agregados reciclados menciona cómo el uso de áridos reciclados secos disminuye la fluidez de la mezcla, principalmente por la absorción, la forma y textura de los agregados reciclados. Los resultados obtenidos arrojan que

la mayoría de los asentamientos de las mezclas con material reciclado se pueden clasificar como mezclas blandas (ICCYC, 2009) y están ligeramente por debajo del valor obtenido para la mezcla patrón. Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al concreto en estado fresco se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 . Resultados obtenidos en pruebas realizadas al concreto fresco

Combinación	Muestra No.	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Agua / Cemento	Peso unitario (kg/m ³)	Contenido de aire (%)
100 % Natural	N3 100%	103	20,8	0,50	2465	1,3
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B1 30%	43	24,1	0,53	-	-
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B2 30%	50	21,7	0,48	-	-
30% Baldosas prefabricadas 70 % Natural.	B3 30%	72	22,5	0,50	2395	1,50
30% Pared de mampostería 70 % Natural.	M1 30%	72	23,4	0,49	-	-
30% Pared de mampostería 70 % Natural.	M2 30%	60	22,8	0,49	2415	1,50
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C1 30%	85	22,6	0,49	-	-
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C2 30%	90	23,2	0,49	-	-
30% Concreto colado en sitio 70 % Natural	C3 30%	83	22,2	0,51	2409	1,30
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B1 50%	91	24,1	0,51	-	-
50% Baldosas prefabricadas 50 % Natural.	B2 50%	80	22,9	0,58	-	-
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M1 50%	95	23,0	0,51	-	-
50% Pared de mampostería 50 % Natural	M2 50%	95	22,7	0,51	2377	1,60
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C1 50%	78	23,3	0,55	-	-
50% Concreto colado en sitio 50 % Natural	C2 50%	70	23,2	0,50	-	-
100% Baldosas prefabricadas	B1 100%	90	23,3	0,56	-	-
100% Baldosas prefabricadas	B2 100%	76	23,4	0,52	2312	1,90
100% Pared de mampostería.	M1 100%	89	22,0	0,55	-	-
100% Pared de mampostería	M2 100%	79	22,6	0,59	2303	1,90
100% Concreto colado en sitio	C1 100%	76	23,4	0,53	-	-
100% Concreto colado en sitio	C2 100%	76	22,2	0,53	2300	1,90

Todas las temperaturas de las mezclas de concreto se encontraron dentro de los rangos normales. Respecto a la relación agua - cemento a/c, se observa como conforme aumenta la cantidad de agregado reciclado incrementa la relación a/c, esto ocurre por la alta porosidad presente en el agregado reciclado (Hoffmann et al, 2012). Respecto a los pesos unitarios todas las densidades se pueden clasificar como normales, con una ligera disminución en las muestras con 100 % de agregado reciclado. Respecto al contenido de aire, todas las mezclas se encontraron dentro del rango esperado, concordando con lo expuesto por Poveda (2008), Bazalar y Cadenillas (2019) y Caycho y Espinoza (2009).

Por último, como parámetro para evaluar la posibilidad del uso de agregado grueso reciclado en las mezclas de concreto es determinar cómo se comporta la resistencia a la compresión (Figura 3). Otros parámetros de interés para dicha evaluación quedan fuera del alcance de la presente investigación, a sabiendas de que son relevantes y deben analizarse en futuras investigaciones, tales como: la durabilidad, el desgaste cíclico, la influencia de la alcalinidad en los agregados reciclados, entre otras.

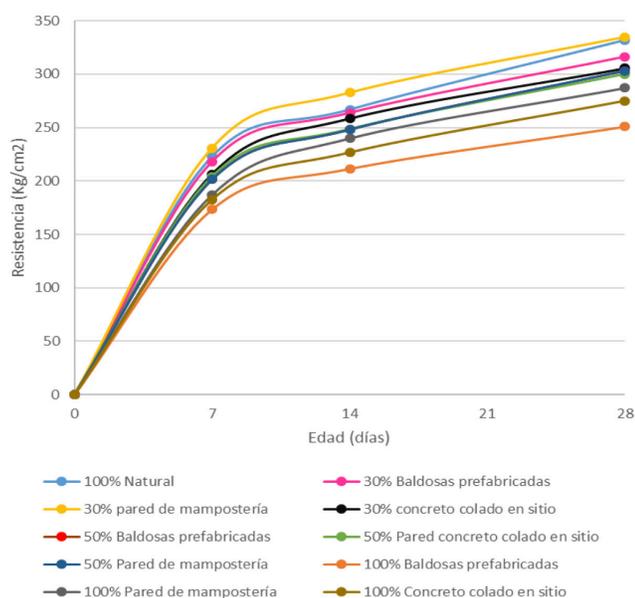


Figura 3. Resistencias a la compresión obtenidas a 7, 14 y 28 días

En los cilindros de las tres fuentes se presentó una disminución de la resistencia con el aumento del porcentaje de agregado grueso utilizado, sin embargo, todas las mezclas con agregado grueso reciclado presentaron resistencias mayores a los 210 kg/cm², de igual forma cada espécimen sin promediar superaron el valor de f'_c propuesto. Por otra

parte, las mezclas que contenían agregado grueso reciclado de pared de mampostería dieron mayores resultados que las que contenían agregado grueso reciclado de concreto colado en sitio y baldosas prefabricadas. Una de las causas de este comportamiento es el contenido de piedra caliza proveniente de Nicoya en los bloques de mampostería. La piedra caliza formada bajo presiones altas es densa y muy resistente, con porcentajes de abrasión bajos (Cham et al, 2003).

5. CONCLUSIONES

Los estudios realizados permitieron llegar a las siguientes conclusiones respecto a la posibilidad de utilización de escombros como fuente de agregados gruesos para concreto:

- En el país existe legislación respecto al manejo y aprovechamiento de residuos que puede servir de base para este uso de los escombros; pero falta concretarlo y se potencializarse su reciclaje.
- Los agregados gruesos reciclados requieren de un proceso de tamizado para obtener la granulometría deseada y de un diseño de mezcla específico que contemple sus particularidades. No se pueden utilizar “recetas” a la hora de utilizarlos para mezclas de concreto.
- Los resultados obtenidos de la caracterización del agregado reciclado son menos favorables en comparación con el agregado natural; en especial deben vigilarse los porcentajes de absorción y el contenido de polvo. normales apear de ello se pueden ajustar los agregados reciclados para cumplir con los parámetros recomendados para la elaboración de concreto.
- Con respecto a las pruebas realizadas al concreto con agregado reciclado en estado fresco, todas mostraron resultados positivos. Al igual que con las mezclas con agregados tradicionales, se debe tomar en cuenta el absorción y contenido de humedad de todos los agregados al realizar los diseños de mezcla, y particularmente para el caso de agregados reciclados estos valores tienden a ser mayores a los de agregados de fuentes vírgenes.
- La resistencia a la compresión de las mezclas con 30% de agregado reciclado dieron resultados muy similares a los resultados con 100% agregado natural. Conforme se aumentó el porcentaje de agregado reciclado se disminuyó la resistencia, siempre con resultados superiores a la resistencia de diseño (210 kg/cm²). Estos resultados llevan a concluir que se considera aceptable la fabricación de concreto con agregado reciclado.
- Desde el punto de vista de la resistencia a la compresión, la mezcla con agregado reciclado de pared de mampostería

presentó los mejores resultados a 28 días en sus tres combinaciones en comparación con el agregado reciclado de baldosas prefabricadas y de cilindros concreto colado in situ. Cabe considerar que en este caso el método constructivo de la pared de mampostería siguió altos estándares que pueden influir en la calidad del agregado obtenido. Se requeriría más experimentación con paredes de mampostería construidas con las prácticas comunes del mercado costarricense. Además de requerirse los estudios de la durabilidad del material.

- El factor más importante a tomar en cuenta en la elaboración de concreto con agregado reciclado es conocer la absorción del material y la humedad al momento de mezclado, pues estos difieren significativamente de los parámetros del agregado virgen e influyen directamente en las resistencias alcanzadas para el concreto. Al momento de la elaboración del concreto se recomienda agregar los agregados reciclado y una porción del agua (mezclado en dos etapas) para garantizar la condición del agregado superficie saturada seca.

5.1. Recomendaciones para futuras investigaciones

Analizar las características de las fuentes de materiales vírgenes utilizados originalmente para los escombros procesados y los métodos constructivos, pues estos podrían afectar las características del agregado reciclado. Se requeriría comparar los resultados de esta investigación con fuentes de residuos provenientes de procesos constructivos en otras circunstancias.

Caracterizar el agregado reciclado de forma química para la elaboración de concreto y mortero, tomando en cuenta aspectos como reacción álcali-agregado y susceptibilidad al ataque de sulfatos.

Analizar experimentalmente el comportamiento de concreto con agregado fino reciclado, para determinar si existe una pérdida significativa en la resistencia a compresión u otras características que se vieran comprometidas.

Evaluar las características que afectan la durabilidad del concreto como porosidad, absorción, permeabilidad y hermeticidad del concreto con agregados reciclados para tener un indicio del comportamiento del concreto a mediano y largo plazo; así como el comportamiento de vigas con concreto con agregado reciclado para evaluar la capacidad a flexión de los elementos.

Realizar un estudio comparativo entre el impacto ambiental de la trituración y reutilización de escombros versus de la extracción de material virgen de tajos y ríos en Costa Rica.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los técnicos y directivos del LanammeUCR por los recursos facilitados para la presente investigación, en especial al Laboratorio de Concretos y el Laboratorio de Estructuras.

7. REFERENCIAS

- Abarca, L., Leandro, G. (2016). *Situación actual de la gestión de los materiales de construcción en Costa Rica*. Tecnología en Marcha, 29(4), 111-122.
- Alonso, A., Bedolla, J., Chávez, H., González, F., Hernández, H., Lara, C., Martínez, W., Martínez, W., Pérez, J., Torres, A. (2015). *Concreto reciclado: una revisión*. ALCONPAT 5(3), 5(3), (52-199).
- Bazalar, L. y Cadenillas, M. (2019). *Propuesta de agregado reciclado para la elaboración de concreto estructural con $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ en estructuras aporricadas en la ciudad de Lima para reducir la contaminación ambiental*. Tesis para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Castro, J. (2019). *Cuantificación y caracterización de residuos de construcción para viviendas unifamiliares en la gran área metropolitana*. Proyecto Final de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Caycho, H. y Espinoza, D. (2009). *Mezcla de concreto con agregado grueso reciclado usando cemento portland tipo HS para cimentaciones, distrito la molina, año-2019*. Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Ricardo Palma.
- Cham, J., Solís, C. y Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería* 7(2). 39-46
- Cruz, N. (2015). *Gestión de residuos de construcción y demolición: Análisis y propuesta para el cantón de Alajuela Costa Rica*. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Magister en Medio Ambiente con mención de Ingeniería de Tratamiento de Residuos, Universidad de Santiago de Chile.
- Di Maio, A., Zega, C. (2007). *Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón*. IMME, 45(2).
- Hallack, M., Gutiérrez, M., Mungaray, A. (2015). *Reutilización de escombros de concreto hidráulico como nuevo material en procedimientos constructivos: una alternativa sustentable en el noroeste de México*. Revista de la Construcción, 14(2).

- Hoffmann, C. , Schubert, S. , Leemann, A. y Motavalli, M. (2012). *Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material*. Construction and Building Materials, 35, 701-709.
- Kosmatka, S. Kerkhoff, B. Panarese, W y Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Illinois, Estados Unidos. Portland Cement Association.
- León, M. y Ramírez, F. (2010). *Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes*. Revista Ingeniería de Construcción. 25(2), 215-240.
- Malešev, M. , Radonjanin, V. y Bróceta, G. (2014). *Properties of recycled aggregate concrete*. Contemporary Materials, 2, 239-249.
- 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.
- Tam WYV, Gao XF, Tam CM (2005). *Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>
- UNEP. (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. www.unep.org/greeneconomy