



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 19/ Edición N.38
Junio-Diciembre de 2022
Reia3814 pp. 1-20

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Arcila Castro, A.; Fernando Silva, Y.;
Medina, D. F.; Delvasto, S. (2022).
Efecto de tratamientos en agregados
reciclados sobre las propiedades
en estado fresco y endurecido de
concretos autocompactantes.
Revista EIA, 19(38), Reia3814.
pp. 1-20 [https://doi.org/10.24050/
reia.v19i38.1547](https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1547)

✉ *Autor de correspondencia:*

Fernando Silva, Y. (Yimmy):
PhD. Pontificia Universidad Católica
de Chile.
Correo electrónico:
yimmy.silva@uc.cl

Recibido: 19-07-2021
Aceptado: 25-04-2022
Disponible online: 01-06-2022

Efecto de tratamientos en agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de concretos autocompactantes.

ALEJANDRO ARCILA CASTRO¹

✉ YIMMY FERNANDO SILVA²

DIEGO FERNANDO MEDINA¹

SILVIO DELVASTO¹

1. Universidad del Valle
2. Pontificia Universidad Católica de Chile

Resumen

La utilización de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) en nuevas obras civiles se considera el camino hacia la sostenibilidad. Esta investigación presenta la posibilidad del uso de agregado grueso reciclado (AGR) y agregado grueso tratado (AGT) de concreto en la elaboración de concretos autocompactantes (CAC). Para este propósito, dos métodos de tratamiento se realizaron a los AGR, uno de los tratamientos fue mediante desgaste mecánico en un molino de bolas y el otro fue mediante la inmersión en una solución ácida (H_2SO_4) combinado con el desgaste mecánico. Para investigar el efecto de los AGR tratados sobre las propiedades mecánicas de los CACs, diferentes niveles de reemplazo (0%, 20% 40% y 100% en volumen) de agregado grueso natural (AGN) por AGR y AGT se realizaron. En estado fresco se evaluó capacidad de flujo, capacidad de paso y capacidad de llenado mediante el flujo de asentamiento con cono de Abrams, embudo en V y caja en L; y en estado endurecido se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión a los CACs. Los resultados muestran que los CAC con AGR presentaron una disminución en el desempeño de las propiedades en estado fresco y endurecido debido a la presencia del mortero adherido en este tipo de agregados, sin embargo, su trabajabilidad se encontró dentro de los parámetros establecidos por la EFNARC. Las propiedades mecánicas de los CAC con AGT presentaron un mejor desempeño en comparación a los CAC con AGR, debido al retiro del mortero adherido mejorando la resistencia a la compresión todas las mezclas. Además, los CAC con AGT mostraron mejoras en las propiedades de permeabilidad presentando una reducción de porosidad de hasta un 6,06%.

Palabras clave: Concreto autocompactante, resistencia a la compresión, residuos de construcción y demolición, agregados reciclado y agregados tratados

Effect of treatment in recycled aggregate on properties in fresh and hardened state of self compacting concrete.

Abstract

The use of recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW) in new civil works is considered a way to sustainable development. This study presents the possibility of using recycled coarse aggregate (RCA) and treated coarse aggregate (TCA) from concrete in self-compacting concretes (SCC). For this purpose, two treatment methods were carried out to AGR, one of the treatments was by mechanical wear in a ball mill and the other was by immersion in an acid solution (H_2SO_4) combined with mechanical wear. To investigate the effect of different RCAs treatment on the mechanical properties of SCCs, different replacement levels (0%, 20%, 40% and 100% by volume) of natural coarse aggregate (NCA) by AGR and TCA were carried out. In the fresh state, filling ability, passing ability, workability and resistance to segregation were assessed using the Abrams cone (slump flow), V-funnel and L-box, and in the hardened state, tests of compression strength, indirect tensile strength and flexural strength were carried out to the SCCs. The results indicated that the increased proportions of RCA presented a decrease in the performance of the properties in the fresh and hardened state due to the presence of the mortar adhered in this type of aggregates, however, the workability re well-matched with the limitations provided by EFNARC. The SCCs with TCA presented a better performance compared to the SCCs with RCA. The mechanical properties of the SCC with TCA presented a better performance compared to the SCC with RCA, due to the removal of the adhered mortar, improving the compressive strength in all SCC with TCA. In addition, the SCCs with TCA showed improvements in the permeability properties, presenting a reduction in porosity of up to 6.06%.

Key Words: Self-compacting concrete, compressive strength, construction and demolition waste, recycled aggregates and treated aggregates

1. Introducción

El concreto autocompactante se ha considerado uno de los mayores avances de la industria de la construcción a tal punto que se define como una versión sofisticada de los concretos de alto desempeño (Mohammed & Najim, 2020), esto debido a sus excelentes propiedades en estado fresco como son una elevada trabajabilidad, capacidad de paso, deformabilidad y alta resistencia a la segregación (Kapoor et al. 2020), lo que genera beneficios en la puesta en obra como la eliminación del vibrado mecánico, menor tiempo de colocación, buenos acabados finales, menor mano de obra y la eliminación del uso de equipos mecánicos que en la mayoría de los casos generan contaminación auditiva y costos adicionales.

En la búsqueda de contrarrestar el impacto ambiental generado por la industria de la construcción, debido al impacto generado en la fabricación del concreto y la alta demanda de este material compuesto para el desarrollo de la infraestructura de los países, la cual sigue acrecentándose por el aumento de la población y economía (Aslani et al. 2018; Behera et al. 2019), se han realizado varios estudios que buscan materiales y procesos que contribuyan a minimizar los impactos ambientales y con

ello, mitigar el acelerado deterioro del medio ambiente reflejado en los incrementos de temperatura, reducción de fuentes de agua entre otros (Silva et al. 2019; Yang et al. 2020; Chinnu et al. 2021).

Simultáneamente a la alta demanda de concreto, la renovación de estructuras antiguas genera una gran cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD) y la escasez de agregados naturales, el agregado reciclado a partir de estos RCD ha establecido una oportunidad en diversas aplicaciones ingenieriles (Behera et al. 2014; Behera et al. 2019). En la Unión europea se generan 333 millones de toneladas de RCD (Exclusivamente sólidos en el 2014 (Menegaki & Damigos, 2018; Kabirifar et al. 2020), Estados Unidos produce 534 millones de toneladas de y China 2,36 billones de toneladas de RCD (Lopez Ruiz et al. 2020). En Colombia, la producción de RCD asciende a 22 millones de toneladas por año (Minambiente, 2020), y en particular la ciudad de Cali se generan cerca de 2374 m³ de escombros diariamente (CVC, 2018), los cuales están ligados al sector de la construcción, tanto formal como informal.

El uso de agregado reciclado es de vital importancia para el desarrollo sostenible del concreto (Wang et al. 2020) ya que el volumen de los agregados en este material compuesto en general está entre el 60% y 75% (Shi et al. 2016). Sin embargo, las propiedades de los agregados gruesos reciclados (AGR) son generalmente inferiores a los agregados gruesos naturales (AGN), debido principalmente al mortero adherido lo que genera una mayor porosidad y la presencia de microfisuras (Güneyisi et al. 2014). El uso de RCD como AGR en CAC se está estudiando en la actualidad, por lo que el uso de los agregados reciclados en CAC está ganando terreno, lo que refleja sus ventajas particulares y la necesidad de continuar con la investigación en esta área (Revilla-Cuesta et al. 2020).

Para disminuir el efecto adverso generado en las propiedades de los concretos debido al uso del agregado reciclado, existen diversos tratamientos para mejorar las propiedades físicas de los AGR los cuales consisten en eliminar el mortero adherido a la partícula de agregado natural y mejorar el vínculo entre el AGR y el nuevo mortero de cemento (Güneyisi et al. 2014). Güneyisi et al. (2014) estudio el efecto adverso del mortero viejo en los CAC de los agregados reciclados con diferentes tratamientos, como la inmersión en una solución de ácido clorhídrico (HCl) durante 24 horas, impregnación en una solución de silicato de sodio (Na₂O • nSiO₂) durante 30 min, y mojado de los AGR en una lechada de cemento-humo de sílice durante 30 min. El tratamiento con la solución Na₂O • nSiO₂ disminuyó la adsorción de agua de los AGR, mientras que el tratamiento en la solución de HCl disminuyó el contenido de mortero adherido, estos dos tratamientos mejoraron la resistencia a la compresión y tracción indirecta de los CAC con AGR, en comparación con el CAC y AGR sin tratamiento. Kazmi et al. (2019) realizaron tratamientos a los agregados reciclados con ácido acético y fricción mecánica mejorando su desempeño, el cual se vio reflejado en las pruebas mecánicas de los concretos que contenían estos agregados reciclados tratados presentaron un aumento en la resistencia a la flexión y tracción indirecta (Kazmi et al. 2019).

En la literatura actual, hay pocos estudios sobre la influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido de AGR tratados en CAC. El uso de AGR en los CAC es un campo de investigación relativamente nuevo, por lo que la presente investigación estudio el efecto de dos tratamientos (tratamiento mecánico y ácido) y la combinación de ellos en AGR sobre la influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido como la resistencia a la compresión, tracción y flexión, y en las propiedades de permeabilidad a edades de curado de 7, 28 y 56 días en CACs con diferentes volúmenes de incorporaciones (20%, 40% y 100%) de AGR y agregado grueso reciclado tratado (AGT).

2. Programa experimental

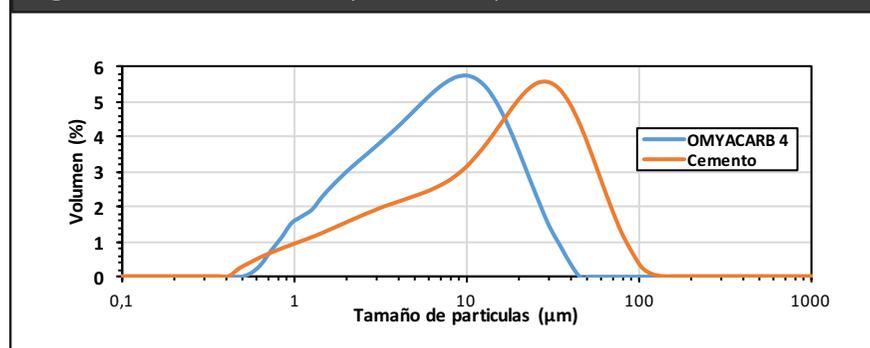
2.1 Materiales

El cemento Portland (OPC) utilizado fue un OPC tipo I (ASTM C150) con un tamaño de partícula medio de 22,7 μm y una densidad específica de 3100 kg/m^3 . La tabla 1 muestra la composición química del OPC obtenida mediante fluorescencia de rayos X (FRX), donde se evidencia que el cemento está constituido principalmente por CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Por otra parte, se usó carbonato de calcio (CC) de alta pureza (Omya Carb 4®) como adición mineral para disminuir el contenido de OPC en el CAC. El CC también se utilizó con el objetivo de mejorar la manejabilidad y resistencia a la segregación de este tipo de concreto. La distribución de tamaño del OPC y Omya Carb 4 se muestra en la Figura 1, donde se evidencia que la adición calcárea presenta un tamaño de partícula más fino que el OPC.

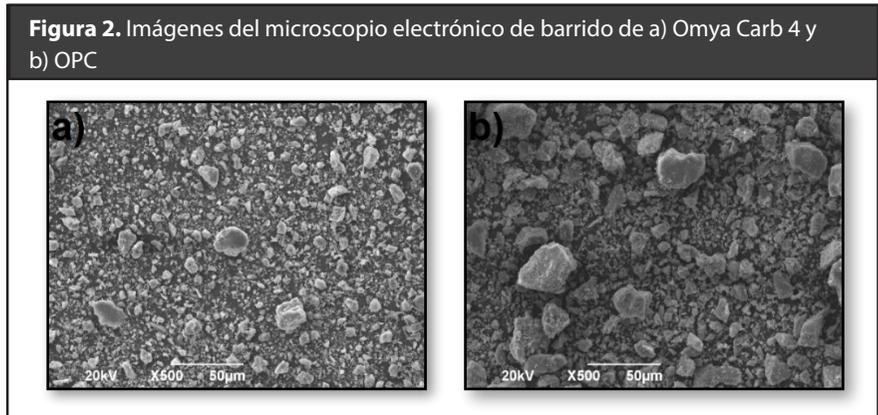
Tabla 1. Composición química y características físicas del cemento (OPC)

Elemento /oxido	OPC (%)
SiO_2	19,39
Al_2O_3	4,13
CaO	55,66
Fe_2O_3	4,7
MgO	1,71
Na_2O	0,32
K_2O	0,28
SO_3	3,9
P.I.*	9,21

Figura 1. Granulometría del Omya Carb 4 (CC) y OPC (cemento)



En la Figura 2 muestra la morfología de la adición mineral calcárea CC y el OPC utilizados para la elaboración de los CACs. Como se puede observar en las micrografías, el tamaño de partículas del CC es bastante pequeña, además de presentar partículas un poco irregulares. El OPC está compuesto por partículas angulares, irregulares y con mayores tamaños que el CC.



El agregado grueso natural (grava) usado fue de origen volcánico (diabasa o basalto) con una densidad y absorción de 2890 kg/m^3 y $1,04\%$. El agregado fino fue arena de río silíceo con una densidad, absorción y módulo de finura de 2590 kg/m^3 , $1,93\%$ y $2,3$ respectivamente.

El agregado grueso reciclado (AGR) se obtuvo del CAC de referencia, con la finalidad de utilizar el mismo agregado natural para los diferentes CAC. Esto se realizó con el propósito de conocer las características del concreto de donde se obtuvieron los AGR, debido a que los agregados reciclados son altamente dependientes del concreto de origen, de la composición química, mineralógica y de su procesamiento. Los AGR se generaron a partir los especímenes del CAC de referencia curados bajo agua durante 28 días. Después del proceso de molturación, los AGR se adecuaron a un tamaño máximo de $12,5 \text{ mm}$ ($1/2 \text{ plg}$) mediante el uso de zarandas (tamices). Posterior a la adecuación de la granulometría, los AGR se sometieron diferentes tratamientos para mejorar su desempeño en la mezclas de CAC. El tratamiento 1 denominado "AGT1", consistió en la remoción parcial del mortero adherido mediante el uso de un molino de bolas. El mortero adherido se pulveriza por la fricción con los cuerpos molidores de hierro que se encuentran en el interior del molino. (Saravanakumar, P. et al., 2016). El segundo tratamiento a los agregados reciclados, denominado "AGT2" consistió en combinar el tratamiento mecánico (AGT1) y un tratamiento químico, el cual consistió en sumergir los agregados en una solución de H_2SO_4 con una concentración de $0,2 \text{ mol}$, esto con la finalidad de debilitar la pasta de cemento en el mortero adherido. El esquema de este tratamiento se presenta en la Figura 3. En la Figura 4 se observa cada uno de los agregados gruesos utilizados, antes y después de los tratamientos.



Figura 4. Diferentes agregados gruesos: Natural (AGN), reciclado (AGR), reciclado con tratamiento 1 (AGRT1) y reciclado con tratamiento 2 (AGRT2)

Un aditivo superplastificante a base de policarboxilatos se utilizó en la dosificación de los CAC para lograr las características de trabajabilidad de acuerdo a las especificaciones y directrices para el concreto autocompactante EFNARC (EFNARC, 2002). De acuerdo con la ASTM C494, el superplastificante usado en esta investigación se clasifica como tipo F.

2.3 Diseño de los CAC

El diseño de mezcla de los CACs se realizó acorde con la EFNARC (EFNARC, 2002). En el presente estudio se realizaron diez (10) mezclas de CAC incluido la mezcla de referencia. Todos los CAC elaborados presentaron una relación constante de agua/cemento constante de 0,49. El material fino estaba constituido de OPC y CC en cantidades de 420kg/m^3 y 80kg/m^3 respectivamente. El agregado grueso natural se reemplazó por AGR, AGT1 y AGT2 en diferentes cantidades en iguales para cada uno de los agregados reciclados (20%, 40% y 100%, en volumen), El contenido de superplastificante se varió en mínimas cantidades según la variación del estado fresco del concreto producido sin afectar la relación A/C. La Tabla 2 muestra la dosificación de los CACs.

Las mezclas de los CAC se realizaron en un trompo mezclador mecánico. Primero, los agregados se mezclaron con $\frac{1}{4}$ de agua del diseño durante dos minutos, seguido se adiciono a la mezcladora el OPC mezclado con el CC, y se dejó mezclar durante dos minutos más. A la mezcla se le añadió la mitad del agua de diseño, y finalmente se le incorporo el SP diluido en $\frac{1}{4}$ del agua del diseño y se dejó durante 3 minutos.

Tabla 2. Proporciones de mezclas del concreto

Mezcla	Cemento (kg/m^3)	CC (kg/m^3)	SP (%)	Agua (kg/m^3)	Arena (kg/m^3)	Grava (kg/m^3)	AGR/AGT1/AGT2 (kg/m^3)
AGN-100% (Referencia)	420	80	0,92	206	937,07	766,7	-
AGR-20%	420	80	0,92	206	904,15	591,81	147,95
AGR-40%	420	80	0,92	206	882,53	433,24	288,83
AGR-100%	420	80	0,90	206	823,45	-	673,73
AGT1-20%	420	80	0,92	206	908,04	594,36	148,59
AGT1-40%	420	80	0,92	206	889,98	436,9	291,27
AGT1-100%	420	80	0,91	206	839,85	-	687,15
AGT2-20%	420	80	0,91	206	910,98	596,28	149,07
AGT2-40%	420	80	0,91	206	895,64	439,68	293,12
AGT2-100%	420	80	0,88	206	852,57	-	697,56

2.4 Preparación de especímenes

Las propiedades en estado endurecido se elaboraron mediante el uso de moldes cilíndricos de 76,2 x 152,4 mm y moldes de prisma de 75 x 75 x 310 mm. Las pruebas de resistencia a la compresión y tracción indirecta se realizaron en los moldes cilíndricos, donde se utilizaron 3 muestras por cada edad evaluada de cada uno de los CAC y se reportó la resistencia promedio. De manera similar, se realizó con la resistencia a la flexión que se evaluó en las probetas prismáticas de CAC. Las muestras se realizaron vertiendo el CAC en los moldes sin ninguna compactación y dejando en reposo la mezcla durante 24 h. Una vez fraguado, las muestras se desmoldaron y se curaron bajo agua hasta la edad de evaluación.

2.5 Propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco se evaluaron mediante la prueba de flujo de asentamiento (*Slump flow test*) la cual estima la capacidad de flujo, además de permitir evaluar la resistencia a la segregación visualmente. La prueba de T_{50} (T_{50} test) evaluó la viscosidad de la mezcla y se ejecuta al mismo tiempo que la prueba de flujo de asentamiento. La prueba de embudo en V (*V funnel test*) y caja en L (*L box test*) evaluaron la capacidad de llenado y la capacidad de paso respectivamente (EFNARC, 2002; EPG, 2005; Bahrami et al., 2020).

La Tabla 3 muestra los criterios de aceptación para los CAC de acuerdo a la *The European guidelines for selfcompacting concrete* (EPG, 2005).

Tabla 3. Criterios de aceptación para el concreto autocompactante.

Método	Unidades	Margen habitual de valores	
		Mínimo	Máximo
Flujo de asentamientos por cono de Abrams	mm	550	800
Flujo asentamiento T_{50}	segundos	2	5
Embudo V	segundos	≥ 2	25
Embudo V a T_{5min}	segundos	+ 0	+ 3
Caja en L	H2/H1	0,8	1

2.6 Propiedades en estado endurecido

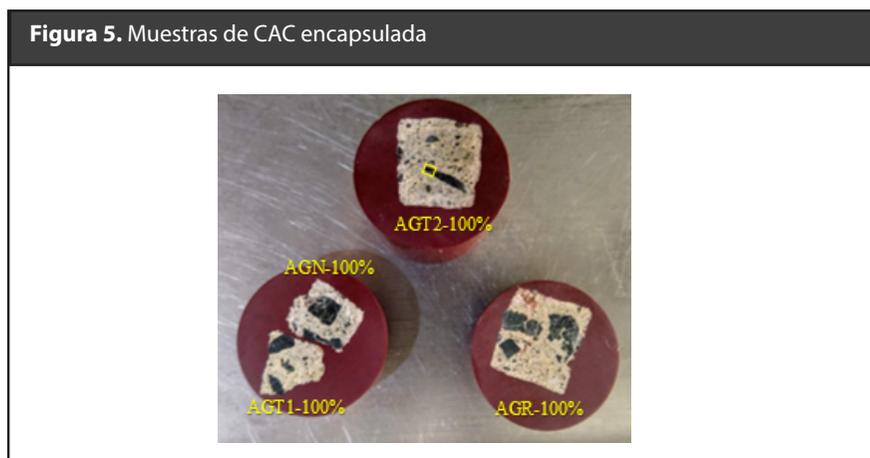
La resistencia a la compresión se evaluó en muestras cilíndricas de acuerdo a la ASTM C39 a la edad de los 7, 28 y 60 días de curado. La resistencia a la tracción indirecta de las mezclas se determinó de acuerdo a la ASTM C496 a los 28 y 60 días de curado. La resistencia a la flexión se determinó a los 28 y 60 días siguiendo las pautas de la ASTM C293.

2.6.1 Propiedades de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad evaluados fueron la absorción y porosidad bajo las especificaciones de la ASTM C642 a los 28 y 60 días, y la sorptividad capilar (succión capilar) fue evaluada mediante la aplicación del procedimiento estándar ASTM C1585, en donde se permite que el agua sea absorbida por la muestra seca a través de un proceso más gradual de succión capilar.

2.6.2 Evaluación microestructura del CAC

La evaluación microestructural se realizó mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido. Para las muestras, AGN-100%, AGR-100%, AGT1-100% y AGT2-100%, las cuales fueron debidamente acondicionadas para este estudio, mediante el encapsulamiento a un trozo de cada una de las muestras como se muestra en la Figura 5.



3. Resultados y discusiones

3.1 Propiedades en estado fresco.

Los resultados de la prueba de flujo de asentamiento se muestran en la Tabla 4. Es claro un decrecimiento en el flujo de asentamiento a medida que aumenta el nivel de reemplazo de AGN por AGR en las mezclas. La disminución del flujo se atribuye a la forma más angular y una superficie más rugosa de los agregados reciclados, lo que dificulta la fluidez de la mezcla (Kapoor et al., 2020), además de un aumento de fricción y área superficial que puede influir en el entrelazamiento de los agregados lo que conduce a una menor capacidad de flujo (Duan et al., 2020)

Para las mezclas de CAC con los AGR tratados (AGT1 y AGT2) los flujos de asentamientos fueron similares y en algunos casos mayores que los CAC con AGR y AGN. El mayor flujo de asentamiento lo presentaron las mezcla AGT1-40% y AGT-100%, este desempeño se atribuye principalmente a lo morfología del agregado, puesto que los AGT1 presentaban una forma menos angular y rugosa debido a su tratamiento, mejorando de esta forma el flujo de asentamiento, ya que al tener una menor cantidad de partículas de textura rugosa disminuye la viscosidad de la mezcla y, por lo tanto, puede aumentar el flujo de asentamiento (Safiuddin, et al., 2011). El T50 en general incremento en los CAC con el aumento de AGR en su composición.

Tabla 4. Resultados de la prueba del Slump y el T_{50}

Mezcla	Slump [mm]	T50 [s]	Clasificación EFNARC
AGN-100%	707	2,91	SF2/VS2
AGR-20%	688	3,80	SF2/VS2
AGR-40%	675	4,81	SF2/VS2
AGR-100%	640	4,50	SF1/VS2
AGT1-20%	723	3,70	SF2/VS2
AGT1-40%	730	3,56	SF2/VS2
AGT1-100%	725	2,59	SF2/VS2
AGT2-20%	677	3,17	SF2/VS2
AGT2-40%	703	2,96	SF2/VS2
AGT2-100%	685	2,79	SF2/VS2

Los tiempos y clasificación de cada uno de los CAC de la prueba en el embudo en V según la EPG (EPG, 2005) se muestran en la tabla 6. El tiempo de flujo en los CAC aumenta con el incremento de AGR en su diseño, sin embargo para los CAC con AGRT1 y AGRT2 en incorporaciones bajas (20%), el tiempo de flujo de asentamiento decreció. La prueba de embudo en V + 5 minutos estuvieron en el rango establecido por la EFNARC. Cuando los CACs presentan tiempos elevados, indica que la mezcla tendrá dificultad en fluir por partes estrechas, lo que podría estar relacionado con una posible segregación del concreto (Carro-López. et al., 2015). Por otra parte, los CAC con AGT1 y AGT2 presentaron comportamientos similares en esta prueba, demandando un mayor tiempo en porcentajes altos de reemplazo del AGN por agregado reciclado tratado. Contario a este comportamiento, las mezclas con AGR presentaron un menor aumento de tiempo lo que significa un menor riesgo de segregación del concreto.

Tabla 5. Resultados prueba embudo en V

Mezcla	Embudo en V	Embudo en V + 5min	Clasificación EFNARC
AGN-100%	11,25	14,22	VF2
AGR-20%	15,00	17,21	VF2
AGR-40%	16,63	18,87	VF2
AGR-100%	14,82	15,11	VF2
AGT1-20%	11,41	13,27	VF2
AGT1-40%	12,17	14,49	VF2
AGT1-100%	12,46	15,50	VF2
AGT2-20%	10,17	12,66	VF2
AGT2-40%	10,58	13,31	VF2
AGT2-100%	13,20	16,81	VF2

Los resultados obtenidos en esta prueba para las diferentes mezclas, así como su clasificación según los criterios establecidos por la EPG (EPG, 2005) se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados prueba caja en L.

Mezcla	Caja L [H2/H1]	Clasificación EFNARC
AGN-100%	0,91	PA2
AGR-20%	0,84	PA2
AGR-40%	0,84	PA2
AGR-100%	0,91	PA2
AGT1-20%	0,87	PA2
AGT1-40%	0,88	PA2
AGT1-100%	0,91	PA2
AGT2-20%	0,85	PA2
AGT2-40%	0,88	PA2
AGT2-100%	0,89	PA2

Como se puede observar en la Tabla 6 los valores obtenidos de la prueba de caja en L varían en un rango de 0,84-0,91. Según las especificaciones y directrices de EFNARC y EPG, todas las mezclas preparadas en este estudio alcanzaron una capacidad de paso apropiada y se clasifican como PA2, esto debido a que el ensayo se realizó utilizando 3 barras y la relación de bloqueo fue mayor a 0,80.

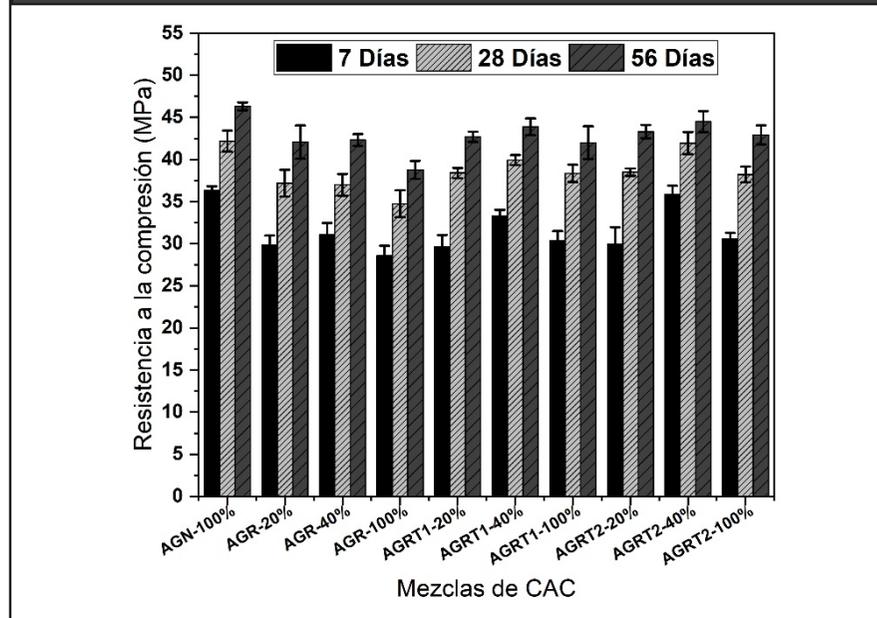
3.2 Propiedades en estado endurecido.

3.2.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión a los 7, 28 y 56 días de curado de los diferentes CAC con agregado reciclado se presentan en la Figura 6. Los resultados a los 7 días de curado arrojaron que la incorporación de AGR en las mezclas de CAC redujeron su resistencia con respecto a la mezcla de referencia (AGN-100%) en un 17,86%, 14,47% y 21,38% para porcentajes de sustitución de AGR de 20%, 40% y 100% respectivamente. Sin embargo, esta reducción de resistencia se hace menor a medida que avanza el tiempo de curado, siendo a los 56 días la diferencia de resistencia de 9,17%, 8,63% y 17,27% menor que el CAC de referencia para porcentajes de sustitución de AGR de 20%, 40% y 100% respectivamente, esto podría atribuirse a que el concreto de donde proviene el AGR tienen el mismo diseño de mezcla, además que el mortero adherido al agregado reciclado va a seguir desarrollando resistencia debido a que este era un mortero joven (apenas 28 días de curado en el instante de molienda del CAC para obtener el AGR).

En general los valores de pérdida de resistencia para sustituciones de 100% encontrados en la bibliografía se encuentran rodeando el 15%-25% (Kou y Poon 2012; Kapoor et al., 2016; Triantafyllou et al., 2017; Ahmad Bhat, 2021). En la Figura 6 también se puede observar que la resistencia a la compresión de los CAC con los agregados reciclado tratados presentaron un mejor desempeño que los CAC con AGR en todas las edades y niveles de reemplazo.

Figura 6. Resultados de ensayos a compresión de los CAC con y sin agregado reciclado



Comparando las resistencias alcanzadas por las mezclas realizadas con AGT1 y AGT2 se aprecia una similitud entre ellas en todas las edades de curado, obteniendo diferencias poco significativas en todos los niveles de reemplazo, estando estas entre 0,7% y 7%. Por ejemplo, para un reemplazo del 20% del agregado natural, la máxima diferencia entre ambas mezclas fue de 0,97% a los 7 días de curado y para un reemplazo del 100% la diferencia fue de 2,12% a los 56 días de curado, obteniendo el mejor desempeño el CAC con AGT2.

La mejora en la resistencia a la compresión de los CAC con AGT se debe a la reducción del mortero adherido en los AGR con los tramientos, disminuyendo de esta forma la adsorción del agregado reciclado y las zonas de interfaz en la mezcla (zona de interfaz vieja + zona de interfaz nueva).

Otros factores que intervienen en la mejora de las propiedades mecánicas se asocian a que en los agregados tratados, el mortero adherido débil se elimina en la medida de lo posible y se mejoraron las características de la superficie del agregado, por lo que la zona de transición interfacial entre el AGT y la matriz nueva mejora (Saranakumar, P. et al., 2016), adicional a este fenómeno, la eliminación de partículas sueltas en la superficie de los AGR debido al tratamiento puede resultar en un contacto más fuerte en la ITZ entre la pasta de cemento y el AGT (Ismail y Ramli, 2013).

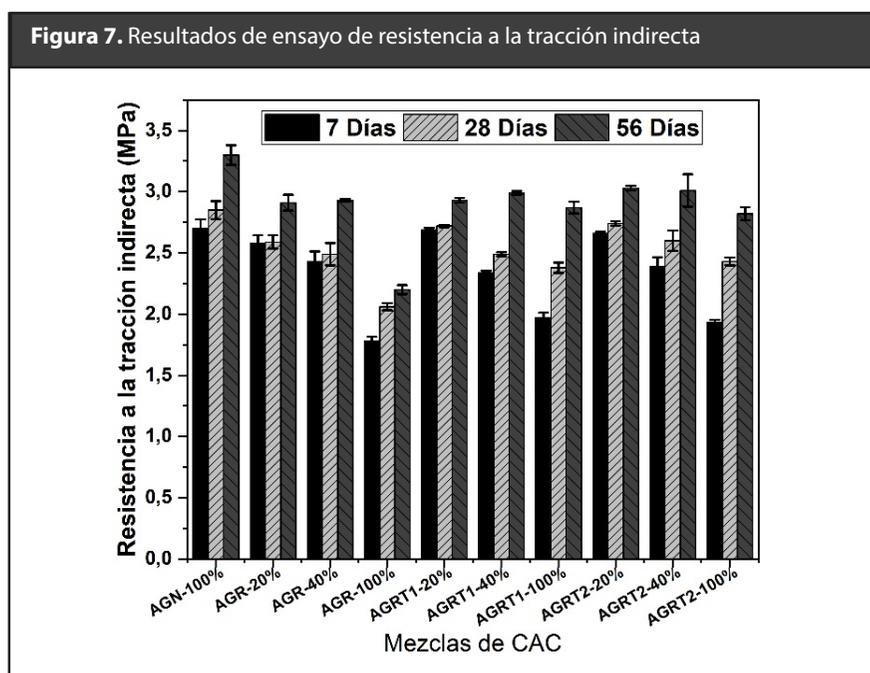
3.2.2 Resistencia a la tracción indirecta

La Figura 7 muestra la resistencia a la tracción indirecta de los CAC con AGN, AGR y AGT a los 7, 28 y 56 días de curado realizados de acuerdo a la ASTM C496. Todos los CAC con agregado reciclados (sin tratar y tratados) presentaron una disminución en esta propiedad mecánica en todos los niveles de reemplazo, siendo cada vez mayor la disminución a medida que aumentaba el contenido de AGR, siendo más notorio a los 28 y 56 días de curado.

A los 7 días de curado, se puede apreciar que la resistencia a la tracción indirecta más alta se logró con el CAC con AGN. Sin embargo, los CAC con reemplazo de 20% del agregado natural por agregado reciclado presentaron una disminución de 0,37

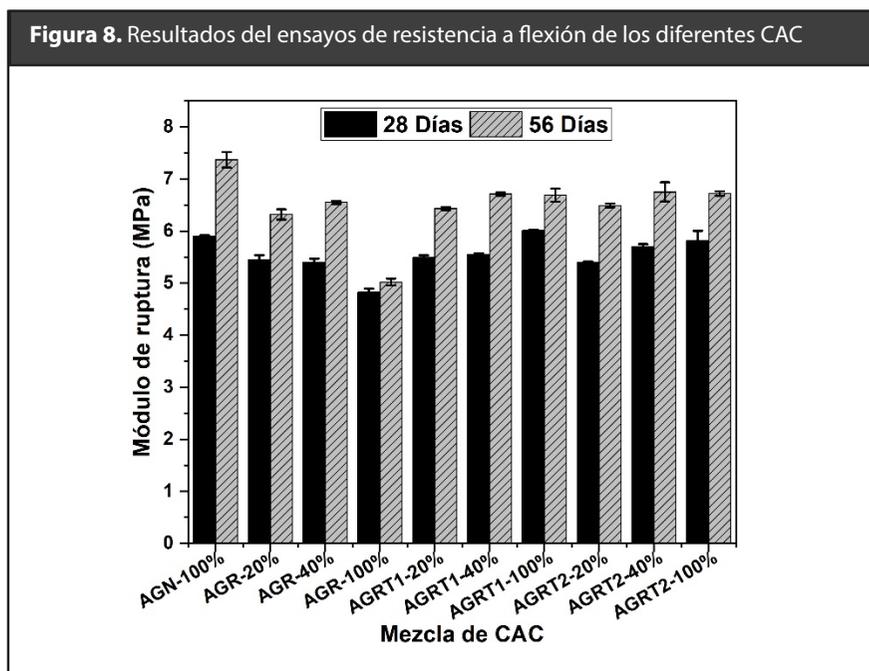
y de 1,48% en los CAC con AGT1 y AGT2 respectivamente, no siendo una pérdida de resistencia muy significativa. A los 28 días de curado, la diferencia entre el CAC de referencia con las mezclas con 20% de AGT1 fue de 4,56% y para AGT2 fue de 3,85%. Al cumplir los 56 días de curado, la mayor caída de resistencia lo presenta el CAC con 100% de agregado reciclado (AGR-100%), alcanzando una resistencia de 2,2 MPa frente a 3,33 MPa desarrollada por el CAC de referencia.

El efecto de los tratamientos en los agregados reciclados genero un mejoramiento positivo al ser incluidos en las dosificaciones de los CAC, mejorando la capacidad mecánica al compararse con los AGR sin tratar. Grdic, Z. et al, 2010 en su estudio obtuvo un comportamiento similar, así como la investigación desarrollada por Tam et al., 2006. Este fenómeno se atribuye a la pérdida de 22,91% y 31,32% de mortero adherido de la superficie de los AGR, generando densidades más altas en los AGR tratados, acompaña de una menor porosidad y adsorción.



3.2.3 Resistencia a la Flexión

El ensayo de resistencia a flexión se realizó a edades de 28 y 56 días de curado de acuerdo a la norma ASTM-293. De este ensayo se obtuvo el módulo de rotura, como se muestran en la Figura 8 en donde se aprecia un comportamiento muy similar en todos los resultados, estando estos valores entre el 15-22% de la resistencia a compresión, siendo un factor positivo puesto que en la bibliografía se reporta valores entre el 12% al 22% de la resistencia a compresión a la edad correspondiente (Kesler,1954) o 0,201 de la resistencia a la compresión del cubo a los 28 días de curado de acuerdo al Eurocode 2 (Beeby y Naranayan, 1995).



Los Módulos de ruptura a 28 y a 56 días de curado muestran que la resistencia se mantiene en un rango similar para todos los reemplazos, a los 28 días de curado la resistencia alcanzada por el CAC de referencia fue de 5,90 MPa, en donde la menor resistencia se obtuvo con AGR-100% logrando 4,82 MPa. En general los diferentes porcentajes de reemplazos de AGR no tienen gran influencia sobre el comportamiento a flexión del CAC, de manera similar Limbachiya et al. (2000) y Beltrán et al. (2014) encontraron que la resistencia a los esfuerzos flexionantes no difieren en gran medida cuando se utiliza AGR en concretos de alta resistencia. Por otra parte, a los 56 días de curado, el módulo de ruptura aumento para todos los CAC como se esperaba por el mayor grado de hidratación de las mezclas. En esta edad, la mayor resistencia la presentó la mezcla AGN-100% logrando 7,37 MPa. Las mezclas que contienen AGT1 y AGT2 a diferencia de la resistencia a la compresión y tracción los valores son muy similares en todos los reemplazos, estos valores se encuentran en el rango de 6,43MPa a 6,71 MPa y 6,49 MPa y 6,75 MPa respectivamente. Además la resistencia a la flexión solo difiere de la del CAC de referencia entre un 8,41% y 12,75%.

La resistencia en el ensayo de flexión de vigas está influenciada principalmente por el tamaño y calidad de los agregados. Por lo que este comportamiento mostrado por los diferentes CAC con AGR tratado y sin tratar se puede atribuir a la buena adherencia entre el mortero viejo con la nueva interfaz (Ismail, et al, 2013).

3.3 Propiedades de permeabilidad

3.3.1. Absorción, densidad y porosidad

La densidad, porcentaje de absorción y porosidad de los CAC se determinó siguiendo los lineamientos establecidos en la ASTM C642. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7, donde se observa cada una de las propiedades antes mencionadas a los 28 y 56 días de curado.

Tabla 7. Densidad, absorción y porosidad de las diferentes mezclas.

Mezcla	Densidad [kg/m^3]		Absorción [%]		Porosidad [%]	
	28 días	56 días	28 días	56 días	28 días	56 días
AGN-100%	2678	2719	7,14	7,08	16,05	15,58
AGR-20%	2616	2622	7,98	7,91	17,27	17,17
AGR-40%	2604	2622	8,55	8,53	18,21	18,20
AGR-100%	2336	2408	10,58	10,33	20,01	19,92
AGT1-20%	2640	2672	8,02	7,62	17,67	16,69
AGT1-40%	2610	2651	8,11	7,80	17,57	17,22
AGT1-100%	2593	2627	9,54	9,15	19,48	18,92
AGT2-20%	2607	2623	8,19	7,78	17,03	16,41
AGT2-40%	2629	2643	8,19	8,00	17,80	17,16
AGT2-100%	2550	2607	9,40	9,15	19,58	18,95

En todos los casos la densidad de las mezclas aumenta con el aumento de los días de curado, esto debido al aumento de los productos de hidratación del cemento que llenan los poros de la matriz cementicia (Ismail, S. et al., 2017), así mismo el porcentaje de absorción y porosidad disminuye a los 56 días de curado.

Los resultados a los 56 días, muestran que la densidad más alta la presenta el CAC con AGN con un valor de 2719 kg/m^3 , y la menor densidad la mezcla AGR-100% con 2408 kg/m^3 . Las diferencias entre las densidades del concreto AGN-100% con respecto a AGR-20%, AGR 40% y AGR-100% son 3,69%, 3,69% y 12,92% respectivamente; las menor diferencia obtenidas frente a la mezcla control se pueden catalogar como mínimas, encontrándose en un rango de 1,76% al compararse con la mezcla AGT1-20%. La mayor densidad de los CAC con AGR tratado con respecto a los CAC con AGR indica que el tratamiento realizado como se ha venido encontrando logra mejorar las propiedades del concreto. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por otros investigadores (Saravanakumar, P. et al., 2016 y Ismail y Ramli, 2013), quienes atribuyen este comportamiento a la remoción del mortero adherido al AGR.

Para los concretos con AGR la absorción presenta altas diferencias con el CAC de referencia. La mayor absorción la presenta la mezcla con AGR-100% con 31,46%, seguida por AGR-40% y AGR-20% con 17% y 10,49% respectivamente. Estos resultados concuerdan por los obtenidos por Modani y Mohitkar (2014), donde encuentran que la absorción de agua en el concreto con AGR aumenta en un 41% para sustitución del 100% de AGR, esta tendencia se atribuye a la alta absorción del AGR la cual es de 8,33% comparada con la del AGN de 1,04%. Las absorciones de los AGT1 y los AGT2 son menores que la de los AGR en un 9,12% y 24% respectivamente, mostrando el efecto que realizan los tratamientos aplicados.

Todas las mezclas presentan mayor porosidad que el CAC de referencia, los porcentajes de diferencia se puede observar en la Tabla 8 donde la mayor diferencia es presenta en la mezcla AGR-100% con 24,50% y la menor diferencia se encuentra en la mezcla AGT2-20% con 8,35%.

Tabla 8. Diferencias de porosidades entre las mezclas

Mezcla	Diferencias con respecto a	
	AGN-100%	AGR
AGR-20%	12,41%	-
AGR-40%	17,36%	-
AGR-100%	24,50%	-
AGT1-20%	9,89%	2,88%
AGT1-40%	12,66%	5,69%
AGT1-100%	20,51%	5,29%
AGT2-20%	8,35%	4,63%
AGT2-40%	12,35%	6,06%
AGT2-100%	20,63%	5,12%

3.3.2. Succión Capilar

Los resultados de succión capilar de las mezclas diseñadas se muestran en la Tabla 9 a los 28 y 56 días de curado.

Tabla 9. Resultados de la resistencia a la penetración capilar de agua

Mezcla	Permeabilidad k	
	28 días	56 días
Patrón	0,0120	0,0109
AGR-20	0,0153	0,0139
AGR-40	0,0147	0,0155
AGR-100	0,0188	0,0169
TR1-20	0,0135	0,0120
TR1-40	0,0142	0,0125
TR1-100	0,0155	0,0140
TR2-20	0,0122	0,0115
TR2-40	0,0129	0,0117
TR2-100	0,0131	0,0135

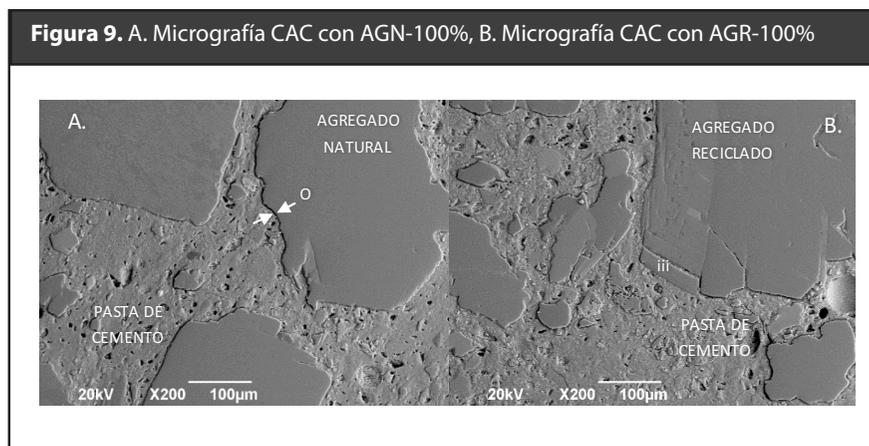
Los resultados obtenidos muestran un claro aumento en cuanto a la permeabilidad capilar a medida que se aumenta el contenido de AGR, AGT1, y AGT2; Se puede apreciar que las menores permeabilidades las presenta AGN-100, siendo estas 0,0120 y 0,0109 ($\text{kg/m}^2 \text{seg}^{1/2}$) para 28 y 56 días de curado respectivamente, este comportamiento se atribuye a que el AGN es un material que no presenta mortero adherido, así mismo un menor porcentaje de poros permeables y menor absorción (Silva, et al., 2016). El mortero adherido a la superficie es un factor relevante que genera un aumento en la permeabilidad a medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de

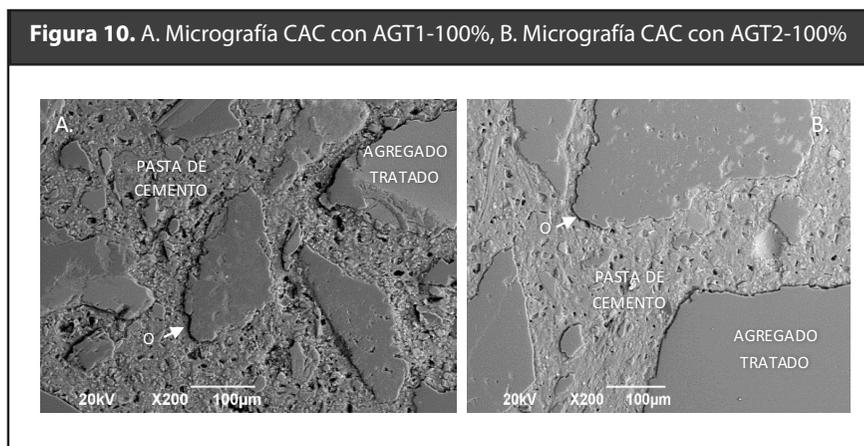
los AGR y AGT. Como se ha mencionado en el presente estudio, el mortero adherido AGR, se caracteriza por ser un material con una densidad menor al AGN, y con una mayor capacidad de absorción de agua, esto indica evidentemente la tendencia clara de este ensayo. Sin embargo, se aprecia una disminución en todas las mezclas de la permeabilidad capilar cuando se hace la comparación a 28 y 56 días, debido a una mayor cantidad de productos de hidratación, los cuales ocupan los vacíos existentes.

3.5 Microestructura del CAC

La evaluación microestructural realizada a las muestras se hizo con el fin de identificar las principales diferencias entre los agregados y la nueva matriz. En la Figura 9 se señalan las interfaces entre la pasta de cemento con AGN y con AGR, en las micrografías de la Figura 9A se presenta la muestra con AGN y en la Figura 9B la muestran con AGR. La pasta de cemento es identificada por la presencia de poros, correspondiente a las zonas negras de mayor intensidad. Para ambos casos es posible ver la separación entre la partícula de agregado y la pasta de cemento, un poco más evidente en el CAC con AGN, esto debido a que la línea que divide la pasta y el agregado es más notoria en estas partículas (señaladas con la letra o), lo cual casi no se percibe en el CAC con AGR, esto puede ser atribuido a la superficie más rugosa y más heterogénea de estas partículas recicladas, lo que contribuye con un mejor anclaje en la interface. Sin embargo, este mejor anclaje entre el AGR y la pasta de cemento no conlleva a un mejor rendimiento mecánico del concreto, puesto que existen otras zonas de interfaciales, por lo que los resultados de las resistencias mecánicas son menores en los concretos con AGR que los realizados con AGN.

Las micrografías que se presentan en la Figura 10, contienen las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido de los CAC que contienen AGT1-100% y AGT2-100%, en estas imágenes se puede observar zonas donde se aprecia una buena adherencia entre el agregado reciclado tratado y zonas donde se aprecia una separación (línea negra).





4. Conclusiones

Este artículo abordó el uso de agregado grueso reciclado (AGR) sin tratamiento y tratado (AGRT1 y AGRT2) como sustituto del agregado natural en concretos autocompactantes (CAC) y su influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido. Con base a los resultados y análisis experimental de esta investigación, las siguientes conclusiones fueron generadas:

Es factible elaborar concretos autocompactantes con diferentes niveles de reemplazo de agregado grueso natural por agregado reciclado.

La eliminación parcial de mortero adherido de los AGR mejora las características de este material, la cual se vio atribuido en las propiedades presentadas por CAC con AGR tratado ((AGRT1 y AGRT2).

Las pruebas en estado fresco de los CAC con AGR muestran una reducción con el aumento del contenido de AGR en las mezclas, este fenómeno se atribuye a la angulosidad y mayor adsorción de estas partículas gruesas. Por otra parte, el efecto de los AGRT fue satisfactorio, ya que en algunos ensayos como el flujo de asentamiento se lograron mejorar la fluidez en comparación con los CAC y AGR.

Las propiedades mecánicas de los CAC se ven afectadas por el tipo de agregado reciclado utilizado, siendo mayor el efecto en las mezclas de CAC con AGR. Las diferencias son más notorias cuando se sustituye el total del agregado grueso natural por los AGR. Aun embargo los CAC con 100% de AGR1 y AGRT2 presentaron resistencia a la compresión muy cercana a la obtenida por el CAC de referencia.

La resistencia a tracción indirecta y a flexión de los diferentes CAC arrojó comportamientos similares a los obtenidos en la resistencia a compresión, por lo tanto, el CAC con AGR y AGT en reemplazos bajos (20% y 40%) cumple con las exigencias mecánicas de los concretos utilizados en estructuras civiles.

La absorción, porosidad y densidad de los CAC mejoran con la incorporación de AGT en comparación con los CAC con AGR. Adicional a este comportamiento, se evidencia que estas propiedades de los CAC están muy relacionadas a las propiedades físicas de los agregados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle y al grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Escuela de Ingeniería de los Materiales. Colciencias-Minciencias y al proyecto 21060 “Aerogeles síliceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en súper aislamiento térmico de edificaciones”.

Referencias bibliográficas

- Ahmad Bhat, J. (2021) Effect of strength of parent concrete on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*. 42: 1462-1469. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.310>
- Aslani F, Ma G., Law Yim Wan D., Muselin G. (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*. 182: 553-566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>
- Bahrami N., Zohrabi M., Mahmoudy S.L., Akbari M. (2020). Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*. 31: 101361. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101361>
- Beeby, A.W. Naranayan, R.S. (1995) *Designers Handbook to Eurocode 2 Part I: Design of Concrete Structures*, Thomas Telford Services Ltd., London.
- Behera M., Bhattacharyya S.K., Minocha A.K., Deoliya R., Maiti S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*. 68:501-516.
- Behera M., Minocha A.K., Bhattacharyya S.K. (2019). Flow behavior, microstructure, strength and shrinkage properties of self-compacting concrete incorporating recycled fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 228:116819 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116819>
- Carro-López, D., González-Fonteboá, B., De Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., & Silva, P. (2015). Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 96, 491–501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.091>.
- Chinnu, S.N., Minnu, S.N., Bahurudeen, A. Senthilkumar, R. (2021). Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates: A step towards cleaner production of concrete. *Construction and Building Materials*. 287: 123056. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123056>.
- Duan, Z., Singh, A., Xiao, J., Hou, S. (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 254: 119232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119232>.
- EFNARC (2002). Specification and guidelines for self-compacting concrete. European association for producers and applicators of specialist building products. [Online] Disponible en: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>.
- EPG (2005). BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC. (2005) The European guidelines for selfcompacting concrete: specification, production and use. The Self Compacting Concrete European Project Group. Disponible en: <http://www.efca.info/download/european-guidelines-for-self-compacting-concrete-scc/>.
- Güneyisi E., Gesoglu M., Algin Z., Yazıcı H. (2014). Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 64: 172-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.090>
- Ismail, S., Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*. 44: 464-476.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014>
- Kabirifar K., Mojtahedi M., Wang C., Tam V.W.Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*. 263: 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- Kapoor, K., Singh, S.P., Singh, B. (2016). Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. 128: 67-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>
- Kapoor, K., Singh, S.P., Singh, B., Singh, P. (2020). Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of self compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*. 32: 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.753>
- Kazmi S.M.S., Munir M.J., Wu Y-F, Patnaikun I., Zhou Y. Xing F. (2019). Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study. *Cement and Concrete Composites*. 104: 103398. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103398>
- Kesler, C. E. (1954). Statistical Relation Between Cylinder, Modified Cube, and Beam Strength of Plain Concrete. *ASTM Proc.*, Vol. 54, pp. 1178-1187.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>
- Lopez Ruiz L.A., Ramón X.R., Domingo S.G. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector e A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*. 248:119238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>.
- Menegaki M., Damigos D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 12:8-15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Miniambeinte (2020). Minambiente reglamenta manejo y disposición de residuos de construcción y escombros. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>.
- Modani, P.O., Mohitkar, V.M. (2014). Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solution for sustainable development, *Int. J. Civil. Struct. Eng.* 4 (3) 430–440. Doi: 10.6088/ijcser.201304010041
- Mohammed, S.I.; Najim K.B. (2020). Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. *Structures*, 23:34-43. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.010>
- Revilla-Cuesta V., Skaf M., Faleschini F., Manso J.M. (2020). Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. *Journal of Cleaner Production*. 262: 121362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121362>
- Safiuddin, M., salam, M. a., Jumaat, M.Z. (2011). Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 11(4): 1023–1041. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60093-4](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60093-4)
- Saravanakumar, P., Abhiram, K., Manoj, B. (2016). Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*. 111: 611–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>
- Shi, C.J., Li Y.K., Zhang, J.K., Li W.G., Chong L.L., Xie Z.B. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. *Journal of Cleaner Production*. 112 (1): 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Silva, Y.F, Lange, D.A., Delvasto, S. Effect of incorporation of masonry residue on the properties of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*. 196: 277-283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.132>.
- Silva, Y.F, Robayo, R.F, Matthey, P.E., Delvasto, S. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*. 124: 639-644. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057>.

- Triantafyllou, D., Ahmed, A., & Kamau, J. (2017). Performance of Recycled Aggregate Concrete after Washing Treatment of Aggregates. *European Journal of Engineering Research and Science*. 2(9): 49-53. <https://doi.org/10.24018/ejers.2017.2.9.468>.
- Wang R., Yu N., Li Y. (2020). Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*. 242: 118164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>
- Yang, R., Yu R., Shui Z., Gao X., Xiao X., Fan D., Che Z., Cai J., Li X., He Y. (2020). Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Journal of Cleaner Production*. 258: 120673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120673>.