

Study of the impact of recycled concrete aggregate (RCA) as a partial substitute for coarse aggregate on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete

Estudio de la incidencia del agregado de concreto reciclado (ACR) como sustituto parcial del agregado grueso en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto autocompactante

Juan Esteban Muñoz-Henao ^a, Yuleidy Andrea Medina- Salas ^b & Michael Steven Buitrago- Tapasco ^c

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. Juan-munoz13@upc.edu.co

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. Yuleidy-medina@upc.edu.co

^cFacultad de Ingeniería, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. michael-buitrago@upc.edu.co

Received:

Received in revised form:

Accepted:

Abstract

The Colombian construction sector is known for the remarkable process of execution and innovation in its constructions, however, it is also the sector of the economy that generates the most non-usable waste annually, also currently the extraction processes of materials such as stone aggregates are highly polluting, which makes the construction sector an environmental challenge for the country, This is why the present research studies the feasibility of including recycled concrete aggregate (RCA) in self-compacting concrete mixes in proportions of 0%, 20%, 30%, and 40% in relation to the weight of natural aggregate with a maximum size of $\frac{3}{4}$ ", this was done by means of the ACI 211. 1 in order to observe the behavior of the rheological properties of the concrete and its variations in the fresh and stiff state. It was observed that the incorporation of recycled aggregates does not significantly affect the flow conditions of the samples, parameters determined by T50 test and air content by pressure method, however, in terms of mechanical resistance to compression, of all the samples it was determined that the highest percentage of gain was achieved after day 14, thus reaching the expected for its design resistance, Likewise, an improvement is observed in relation to the recycled aggregate, since, as the modification percentage increases, the resistance increases in the first percentages (20% - 30%) and presents a significant increase in the modification range of 30% to 40%, the latter being the one that obtained the highest resistance at day 28 of failure.

Resumen

El sector constructivo colombiano es conocido por el destacable proceso de ejecución e innovación en sus construcciones, sin embargo, también es el sector de la economía que más residuos no aprovechables genera anualmente, asimismo en la actualidad los procesos de extracción de materiales como agregados pétreos son altamente contaminantes, lo que convierte al sector de la construcción en un desafío ambiental para el país, es por ello que la presente investigación estudia la viabilidad de la inclusión de agregado de concreto reciclado (ACR) en mezclas de concreto autocompactante en proporciones de 0%, 20%, 30%, y 40% en relación al peso del agregado natural con un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", lo anterior se realizó por medio del método de ajuste de proporciones ACI 211.1 con el fin de observar el comportamiento de las propiedades reológicas del concreto y sus variaciones en estado fresco y rígido. Se observó que la incorporación de agregados reciclados no afecta de manera significativa las condiciones de flujo de las muestras, parámetros determinados por ensayo de T₅₀ y contenido de aire por método de presión, ahora bien, en términos de resistencia mecánica a la compresión todas las muestras arrojaron mayor porcentaje de ganancia luego del día 14, alcanzando así lo esperado por su resistencia al diseño, asimismo se observa una mejoría en relación con el agregado reciclado ya que a medida que aumenta el porcentaje de modificación aumenta la resistencia, en los primeros porcentajes (20% - 30%) se presenta un aumento significativo en el rango de modificación de 30% a 40% siendo este último el que mayor resistencia obtuvo al día 28 de falla.

Palabras clave: Agregado de concreto reciclado, resistencia a la compresión, flujo, modificación, concreto autocompactante

1. Introducción

Como es bien conocido, Colombia se destaca por ser líder mundial en el sector de la construcción, esto debido a los registros de producción de vivienda y crecimiento poblacional que ha presentado el país en las últimas décadas, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018), los censos poblacionales de los años 2005 y 2018 registraron una población de 41,468,384 y 48,258,494 habitantes respectivamente, lo que representó un aumento del 13,37% en un periodo de trece años,

En este contexto, el aumento poblacional se encuentra concentrado, en su mayoría, en las principales ciudades -en específico, en Bogotá con un crecimiento del 7% y Medellín con un porcentaje de 6% [1], dado el desplazamiento de la población residente de las zonas rurales del país a las grandes ciudades en busca de mejores oportunidades de vida. Por otro lado, otro factor importante que en los últimos años ha generado mayor repercusión en este comportamiento demográfico ha sido la entrada de inmigrantes transnacionales que residen actualmente en varias zonas del territorio nacional lo que obliga a los territorios a expandir la oferta de vivienda[2]. De hecho, el Departamento Nacional de Planeación (2020) plantea que actualmente se registran 63 ciudades con más de 100 mil habitantes lo que, en comparación con el año 1950 donde llegaba a 6 la cantidad de ciudades con alto volumen poblacional[3], evidencia que en menos de un siglo los perímetros urbanos se han expandido un 950% (Rodríguez et al., 2022).

Paralelo a dichos fenómenos, el país ha experimentado un aumento de su Producto Interno Bruto (PIB) posicionando a la construcción como el sector de la economía que más contribuye a nivel nacional con un crecimiento del 9.8% para el cuarto trimestre del 2023[4]; esta alza se debe a la gran demanda de edificaciones, materiales y obras de infraestructura que se presenta en el país. Al respecto, se registró una producción de 168.224 viviendas que representan un crecimiento del 28% en referencia al promedio del último quinquenio (2019-2023) [5], el caso puntual de la ciudad de Bogotá, por ejemplo, el (DANE, 2023) reporta que la expedición de licencias de construcción por parte de la Secretaría Distrital de Planeación aumentó un 44.8% para el año 2023[6].

Sin embargo, Pese a lo anterior se evidenció una notable disminución en la producción de concreto premezclado en el periodo comprendido entre los años 2014 y 2022, con un promedio de 7.957 m³ anuales y 5.796 m³ respectivamente, lo que representa un porcentaje de disminución del 27.16%. Vale la pena mencionar que para el año 2020, se registraron cifras de producción de concreto de 4.305 m³ siendo este el año que presenta uno de los descensos más importantes en comparación con los datos históricos de años anteriores, comportamiento que se le atribuye a la pandemia por COVID-19[7].

Aun con esta caída en la producción de concreto, las cifras mencionadas son significativas para evaluar las afectaciones que esto genera al medio ambiente. Según el Sistema de Información Minero (SIMCO, 2023), a nivel nacional se reportó una extracción de material de construcción de 669.200 m³ para el último trimestre del 2023. Asimismo, En el caso particular del Departamento de Cundinamarca, la producción de agregados como materiales de construcción desde 2012 hasta 2022, alcanzó un total de 16.7 millones de m³ [8], es así como de esta manera, la actividad minera se posiciona en el panorama nacional con un aporte en el PIB para el año 2023 de 18 billones de pesos, y se proyecta para el 2024 un leve ascenso en aporte nacional [9].

Es importante mencionar que los datos mencionados corresponden a los registros de minería legalmente reconocida, pero se cree que las cifras son mayores ya que no se conocen cifras precisas sobre los minerales extraídos de forma ilegal, aun así, se sabe que el 73% de la extracción de minerales corresponde a minería no reconocida [10]. Un dato alarmante corresponde al año 2016, cuando se registra una producción ilegal de más de 1 millón de m³ entre arenas, gravas y gravillas; este fenómeno resalta la necesidad de abordar con mayor rigor la problemática de la minería ilegal en el país dado su impacto negativo sobre la sostenibilidad ambiental.

Por ejemplo, tal y como lo menciona Bustillo (2008), todos los minerales empleados para la construcción, antes de ser agregados en mezclas de concreto, pasan por diversos procesos fisicoquímicos que modifican las condiciones naturales del material para ser idóneo en obras de infraestructura. Estos procesos pueden llegar a ser muy simples con una mínima intervención en el producto, pero en casos como las calizas -base fundamental para la elaboración de cemento- se realizan modificaciones altamente contaminantes con el objetivo de tener un material de alta calidad. Arcilla, roca, metal, grava y arena son, en este contexto, los principales materiales no renovables de la industria de la construcción cuya producción ha experimentado un alza significativa aun cuando representan serias implicaciones ambientales.[11]

Sin embargo, otro aspecto crítico el cual, en ocasiones se pasa por alto son los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), material que se considera residuos producto de obras constructivas, reconstructivas, excavaciones y demoliciones de todo tipo, este mismo, actualmente su existencia y disposición han contribuido al deterioro ambiental y paisajístico de los territorios, esto se debe a los procedimientos de demolición, recolección, clasificación y disposición del material. Es así como a nivel mundial existen otras formas de clasificar los RCD. Según Santos Marián et al (2011), los residuos se pueden clasificar, por un lado, de acuerdo con origen o forma, por lo que es posible determinar algunas de sus características; y por otro, por su naturaleza, lo que facilita establecer los procesos de gestión, limpieza y preparación del material.

También, según estos autores, los materiales clasificados según su origen se pueden subclasificar como: Residuos procedentes de puntos de extracción, Residuos procedentes de obras de construcción y residuos procedentes de obras de demolición, los 2 últimos se pueden considerar elementos similares con el diferencial de la mezcla de materiales entre sí que se encuentran en cada uno de los grupos, de igual forma, también clasifican los RCD según su naturaleza, eta el grupo (I) en donde se reúnen los residuos inertes, grupo (II) que corresponde a residuos no peligrosos y grupo (III) correspondientes a residuos tóxicos y peligrosos[12].

Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior, es importante mencionar que, de la pequeña fracción de RCD que se recolecta a nivel mundial, el 70% corresponde a concreto, mortero, ladrillo y cerámica, material que generalmente es recolectado en obra por lo que es común que la separación de este no sea la más adecuada, sin embargo, se destaca que a nivel mundial el elemento que destaca por su capacidad de reutilización corresponde al agregado de concreto reciclado (ACR) [13].

Ahora bien, partiendo de lo anterior, se conoce gracias al trabajo de Rodríguez Lozano et al (2018), que para el año 2018 en Colombia se generaron 22 millones de RCD de los cuales el 68% corresponde

a lo generado en la capital Colombiana [14], al respecto la secretaria distrital de ambiente, reporta la existencia de 32 millones de residuos en la capital, de los cuales, solo al 20% se les realiza un proceso de aprovechamiento, mientras que un 40% pasa por procesos de clasificación y limpieza, Estas cifras dejan en evidencia la necesidad de mitigar la producción o la mala disposición de dichos elementos. Por tanto, es posible adoptar el concepto de *economía circular* como alternativa para aprovechar y reutilizar los RCD con un mínimo de contaminación en el proceso [15].

Gracias a esto, en el año 2014 la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (2015) crea la “Guía para la Elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición en Obra”. Allí se realiza una clasificación de los RCD como residuos aprovechables y no aprovechables con los debidos procesos de tratamiento según corresponda, también, con respecto a la recolección en obra, la guía plantea la existencia de diferentes maneras de facilitar este proceso, una de ellas, es la *demolición controlada* que consiste en migrar de la demolición convencional a la demolición sectorizada para permitir la preselección de los elementos según la etapa de demolición [16].

Del mismo modo, se sugiere la implementación de planes de acción que, desde la planeación del proyecto, contemple el cálculo del volumen del RCD que será generado en los procesos de demolición/construcción, lo que supone una mejor organización de posteriores procesos de tratamiento del residuo.

Ahora bien, en el campo del conocimiento se encuentran investigaciones donde se evalúan los cambios de las propiedades que representa la modificación de mezclas de concreto con agregados reciclados, estudios en los que el concreto autocompactante ha jugado un papel importante dadas las condiciones de fluidez y trabajabilidad que presenta. No obstante, las indagaciones con este tipo de mezcla con RCD representa una mínima parte del campo de conocimiento, generando así cuestionamientos acerca de su viabilidad y funcionalidad en el sector constructivo; En particular, a nivel mundial se ha evaluado el proceso de reutilización de materiales que han finalizado su ciclo de vida útil, entre los cuales destacan los RCD, categoría que reúne un sinnúmero de elementos potenciales, entre ellos, el *agregado de concreto reciclado* (ACR).

Enfocado en ello, Grdic et al. (2010) Investigaron el potencial uso del *agregado grueso reciclado obtenido del concreto triturado* para la fabricación de mezclas de concreto autocompactante. Para tal fin, se diseñaron tres diferentes mezclas, una mezcla de concreto de control y dos mezclas de concreto con un 50% y 100 % de reemplazo del agregado grueso natural por ACR con el fin de evaluar el comportamiento de estas tanto en estado fresco como rígido, y determinar la viabilidad de su uso; se realizaron pruebas de flujo y viscosidad, así como ensayos para el estudio de la resistencia a flexión y compresión en los especímenes.

Con base en los resultados obtenidos, los autores mencionan que el tiempo estimado de caída de flujo para un concreto autocompactante corresponde a un rango de 3.5 a 6.0s, parámetro que todas las mezclas cumplen. Sin embargo, el autor aclara que el tiempo de caída del flujo es proporcional al porcentaje de remplazo en la mezcla, es decir, se registra un mayor tiempo en la mezcla con modificación del 100%. Ahora bien, en lo que respecta a la resistencia mecánica, en las muestras modificadas con 50% y 100% se presentó una disminución de la resistencia por flexión de 2.3% y

13.9%; y una reducción en la resistencia a la compresión de 3.88% y 8.55% respectivamente [17].

Por otro lado, Siguiendo el hilo argumentativo centrado en la reutilización e incorporación de ACR en mezclas de concreto autocompactante, se evidencia que, en China, siendo uno de los países más genera RCD a nivel mundial, se desarrollan innumerables investigaciones sobre su reutilización. Por ejemplo, Sun et al. (2020) desarrollaron una investigación orientada a evaluar la viabilidad de fabricar mezclas de concreto autocompactante con incorporación de ACR. Dicho estudio se desarrolló sustituyendo de manera parcial el agregado grueso natural por ACR en proporciones de 0%, 25%, 50% y 100% en relación peso/peso, y evaluando propiedades como trabajabilidad, fluidez, viscosidad, resistencia a la compresión, la tracción y la flexión; en este caso, el ACR fue analizado en términos de porcentaje de absorción de agua con 4% en 24 horas por medio de doce muestras cubicas de 100 x 100 x 100 mm y seis prismas de 40 x 40 x 160 mm.

Se concluyó entonces que, en cuanto a la evaluación de las propiedades reológicas, las mezclas con una modificación mayor al 50% reportan una disminución del asentamiento del 13.4%, pero en tanto aumenta la sustitución, el porcentaje de sustitución influye negativamente en la resistencia a la compresión tanto a los 7 días como a los 28 días. De hecho, en la evaluación de las propiedades en estado rígido se evidenció que para la muestra con modificación del 25% de ACR, el valor de la resistencia a la flexión aumenta un 7.23% y de la resistencia a compresión aumentó el 20.7%, alcanzando así el 95% de la resistencia de diseño a la edad de 28 días. En contraste, se observó la reducción del 6.9% en la resistencia a la compresión para porcentajes de remplazo de 70% y 100%, tendencia que también se observa en la resistencia a la tracción, la cual se torna negativa cuando el porcentaje de remplazo supera el 50% [18].

En esa misma línea, Mandal et al. (2023) exploraron las propiedades reológicas del concreto autocompactante variando el contenido de ACR. La investigación evaluó propiedades reológicas en mezclas con contenido de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de árido reciclado en relación con el peso total del agregado natural, Los tamaños máximos de ACR utilizados ascendieron a 20 mm equivalente al tamiz $\frac{3}{4}$ ”. Para este caso, se determinó que el aumento del límite elástico en relación con el incremento en la proporción de ACR se debe a que la fricción entre partículas aumenta y disminuye la relación agua-cemento. Dicho aumento fue de 2.4%, 8.3%, 57.4% y 76.8% para cada porcentaje de modificación.

De igual manera, se observó que la viscosidad plástica aumentó por la misma razón, en relaciones de 7,2%, 19,1%, 35,5% y 55,7%. Esto se justificó en la superficie irregular de las partículas y la existencia de poros en la superficie por la presencia de mortero residual adherido al ACR, lo que aumenta la fricción entre partículas y disminuye el contenido de agua de mezclado [19].

Ahora bien, en una investigación realizada por Duan et al. (2020), en el continente asiático, evaluaron las propiedades de un concreto autocompactante con agregado grueso reciclado producto de demolición de concreto remplazando el agregado grueso natural en un 25%, 50% y 100% en relación peso/peso; para el diseño de mezcla del concreto se utilizó agregado reciclado con tamaño máximo de 12 mm correspondiente a un Tamiz $\frac{1}{2}$ ”. Se ensayaron propiedades en estado fresco como asentamiento, parámetro que se mantuvo en un 10-20% a medida que el porcentaje de remplazo aumentó de 0 a 100%.

Lo anterior, en cuanto al análisis de las propiedades mecánicas, de manera inicial se observó que el comportamiento de la resistencia a la compresión fue cambiante con el incremento del agregado de concreto reciclado ya que a medida que la sustitución aumenta, se presenta una disminución de la resistencia en 3,06%, 1,17% y 1,76% para los mismos porcentajes de dosificación; un comportamiento similar a lo encontrado en la resistencia a tracción, en donde se reporta una disminución de 18%, 20% y 29% respectivamente. Finalmente, los autores concluyen que, si bien se presenta una taza de reducción de resistencia en el concreto modificado, esta se intensifica cuando el uso de agregado reciclado supera el 50% [20].

Llegando a esta misma conclusión, se presenta un estudio realizado por Topcu¹ (1997), en el cual se exploró la viabilidad de utilizar agregado grueso producto de residuos de construcción y demolición (RCD) en un concreto convencional. En su estudio, el autor evaluó la variación de la densidad del concreto afirmando que el rango se encuentra entre 2.200 y 2.600 kg/m³. Así mismo, menciona que al comparar el *agregado de concreto reciclado* con el agregado natural en términos de absorción de agua se entiende que el ACR tiene una capacidad de absorción del 7% aproximadamente, valor que está directamente relacionado a la densidad del material y parámetro de alta porosidad respecto al agregado natural.

Finalmente, el autor analizó la resistencia a la compresión de muestras modificadas con *agregado grueso reciclado* en porcentajes de 30%, 50%, 70%, y 100% en relación con el peso del agregado de la muestra patrón. Como resultado se obtuvo que, en las muestras ensayadas, la resistencia a la compresión disminuyó a medida que aumentó la presencia de agregado reciclado, señalando que dicha disminución llega a un 20% en comparación con la muestra inalterada; de igual manera, se realizó una comparación de estudios realizados en Japón, donde la tasa de disminución de la resistencia a la compresión se reportó en un rango de 14% al 32% a edades tempranas y de 80% a 95% a una edad de 28 días [21].

Finalmente, el autor concluye que se debe tener en cuenta el porcentaje de absorción de agua del material reciclado ya que este suele ser mayor al del agregado grueso natural, y se aclara que la resistencia a la compresión del concreto modificado disminuye, especialmente, si la relación de modificación es superior al 50%.

Pariendo de lo expuesto hasta este punto, se logra evidenciar que, si bien el campo del conocimiento ha estudiado el comportamiento del ACR en concreto, y asimismo, se ha determinado que la sustitución apropiada de modificación equivale a un porcentaje que no supere el 50%; no existe una amplia distribución porcentual al llegar a este límite, como se puede evidenciar en el estado del arte, en el rango de 0%-50% son pocos los porcentajes que se utilizan, mayormente asciende a un porcentaje en lo que se puede llamar el rango óptimo de modificación; es por ello que la presente investigación plantea el uso del *agregado de concreto reciclado* (ACR) en proporciones de 20% 30% y 40% en relación peso/peso, como sustituto parcial del agregado grueso natural en una mezcla de concreto autocompactante, alcance que implicaría evaluar su incidencia en las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de mezclas.

En este sentido, se planea evaluar las propiedades reológicas y mecánicas en cuanto a resistencia mecánica, tiempos de fraguado, manejabilidad, entre otros parámetros. Esto busca, en términos generales, determinar la funcionalidad y el potencial que tiene el *agregado de concreto reciclado* (ACR) para ser empleado en proyectos e industrias civiles a gran escala, contribuyendo así a la

disminución de residuos producto del sector constructivo y la intervención civil en los territorios.

2. Materiales

2.1 Cemento

Para la fabricación de las mezclas de concreto se empleó un Cemento Portland Argos de Uso General, el cual fue caracterizado teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la NTC-121 [22]. Los métodos de ensayo descritos en la NTC-221 [23], NTC-33 [24], NTC-110 [25] y NTC-118 [26], se ejecutaron para tres repeticiones de la muestra del cemento escogido. Se exponen los resultados de lo anterior en la tabla 1.

Tabla 1.
Caracterización cemento uso general.

<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación NTC 121</i>
Densidad	2.9 g/cm ³	-
Finura	5,349.47 cm ² /g	3000-5000 cm ² /g
Consistencia normal	29%	-
Tiempo de Fraguado Inicial	252 min	> 45 min
Tiempo de Fraguado Final	395 min	< 420 min

Fuente: Autores.

2.2 Agregado

Para el diseño experimental de la investigación se utilizaron agregados estandarizados realizando los ensayos requeridos para cumplir los parámetros de la NTC-174 [27]. La caracterización de los agregados (grava (*Ag*) y arena (*Af*)) se llevó a cabo con tres repeticiones de las muestras siguiendo los parámetros de las normas de la NTC-77 [28], NTC-176[29], NTC-237[30], NTC-1776 [31], NTC-92 [32], NTC-93 [33], NTC-127 [34], INVE-230 [35] e INVE-227 [36]. Los resultados de los ensayos en agregados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2.
Resultados de caracterización de agregado natural

<i>Parámetro</i>	<i>Ag</i>	<i>Af</i>	<i>Especificación NTC 174</i>
Tamaño máximo nominal	3/4"	-	-
Módulo de finura	-	3.1	2.3 < MF < 3.1
Gravedad específica	2.6	2.5	2.4 < Ga < 2.9
% Absorción	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
% Humedad	1.17%	1.72%	< 5%
Masa unitaria compacta	1.01%	1.99%	-
% Desgaste	1453.51	1590.33	1,300 – 1,850
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
	18.63%	-	< 30%

Contenido de impurezas	-	1	< 3
Índice de alargamiento	12.34%	-	< 30%
Índice de aplanamiento	23.44%	-	< 30%
% Caras fracturadas	92.64%	-	Angular y Rugosa

Fuente: Autores

2.3 RCD

Para realizar las mezclas de concreto modificado es necesario realizar caracterización del material de modificación (ACR). La caracterización se llevó a cabo con tres repeticiones de las muestras de cada uno de los ensayos teniendo en cuenta los parámetros para agregado grueso expuesto en las normas NTC-77 [28], NTC-176 [29], NTC-1776 [31], NTC-92 [32], NTC-93 [33], INVE-230 [35] e INVE-227 [36]. Los resultados de la caracterización de ACR se exponen en la tabla 3.

Tabla 3
Resultados de caracterización material de modificación (ACR)

Parámetro	ACR	Especificación NTC 174
Tamaño máximo nominal	3/4"	-
Gravedad específica	2.1 g/cm ³	2.4 < Ga < 2.9 g/cm ³
% Absorción	4.4%	< 5%
% Humedad	4.2%	-
Masa unitaria compacta	1,300 kg/m ³	1,300 – 1,850 kg/m ³
% Desgaste	23.19%	< 30%
Índice de alargamiento	6.92%	< 30%
Índice de aplanamiento	14.13%	< 30%
% Caras fracturadas	93.39%	Angular y Rugosa

Fuente: Autores

3. Diseño experimental

3.1 Diseño de mezcla

El diseño experimental de la mezcla patrón de Concreto Autocompactante se realizó teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los laboratorios anteriormente mencionados de caracterización de materiales constituyentes. Para este fin, se emplearán los procedimientos descritos en el Método ACI 211.1 y los parámetros de modificación según las Normas ACI 237R – 07 y ACI 234R-14, el cual dosifica en proporciones de peso y volumen la cantidad de agregados naturales cemento y agua para la mezcla

óptima de concreto. Se exponen los resultados del diseño de mezcla de muestra patrón en la tabla 4.

Tabla 4
Diseño de mezcla muestra patrón

Material	W Seco (kg/m ³)	W Ajustado (kg/m ³)	Volumen (lt/m ³)
Cemento	422.22	422.22	138.89
Agua	190.00	189.08	189.08
Aire	-	-	20.00
Agregado grueso	845.94	845.94	325.36
Agregado fino	843.69	846.08	326.67
Total	2301.85	2303.32	1000.00

Fuente: Autores.

4. Incorporación de RCD

La incorporación del Agregado de concreto reciclado (ACR) en la mezcla de concreto como se mencionó anteriormente, se realizó en relación al peso del agregado natural determinado en el diseño de mezcla de la muestra patrón, valores expuestos en tabla 4; el agregado se adicionó teniendo en cuenta los porcentajes determinados 20%, 30% y 40%, lo anterior se dedujo gracias al histórico de investigaciones de los autores a este punto ya expuestos, obteniendo así 4 muestras con variación en las proporciones de agregado natural y agregado reciclado como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5
Proporciones en Kg de materiales por m³ mezclas modificadas

Material	ACR 20% (kg/m ³)	ACR 30% (kg/m ³)	ACR 40% (kg/m ³)
Cemento	422.22	422.22	422.22
Agua	184.99	184.99	184.99
Aire	-	-	-
Agregado grueso	716.76	627.16	537.57
Agregado fino	486.08	486.08	486.08
ACR	179.18	268.78	358.37
Total			

Fuente: Autores

Figura 1
Muestras de agregado con incorporación de ACR



Fuente: Autores

4.1 Caracterización concreto autocompactante en estado fresco

Ahora bien, con el fin de determinar la variación de las propiedades en estado fresco de las mezclas de concreto se realizaron ensayos según lo expuesto en la norma NTC 1377, en donde se determina por medio de ensayos de laboratorio las variables de masa unitaria (M_{Real}), contenido de aire por método de presión (a) y rendimiento volumétrico (Y Volumétrico), relacionando la masa unitaria tanto real como teórica como se expone en la tabla 6, se puede evidenciar que la masa unitaria real presenta un aumento en todas las muestras respecto a la masa unitaria teórica, este cambio se logra representar en porcentajes de 16.41%, 14.33%, 14.07%, 14.32%, para las mezclas modificadas con 0%, 20%, 30%, y 40% respectivamente; se puede evidenciar que la variación más significativa se presenta en la muestra patrón, pero, en lo que respecta la dispersión entre las variaciones en los datos de masas unitarias, se evidencia que existe una diferencia más significativa entre las muestras modificadas y la muestra patrón que entre las mezclas con 20%, 30% y 40% en donde la variación entre ellas no supera el 1%.

Por otro lado, en cuanto a la masa unitaria real en relación con los porcentajes de modificación con ACR, se logra deducir que respecto a la muestra patrón existe una pequeña variación la cual se puede determinar no representativa ya que equivale a la disminución de 2.17%, 2.12% y 2.17%, variaciones que corresponden a la muestra de concreto convencional en comparación con las modificadas al 20%, 30%, y 40% respectivamente.

Por otro lado, en cuanto al rendimiento volumétrico ($Y_{Volumétrico}$) como se observa en la tabla 6, al igual que en el análisis de masa unitaria, la variación entre la muestra C+ACR0% y las muestras modificadas es de 0.02%; además, se puede observar que para las 3 mezclas modificadas, no existe una variación en el valor del rendimiento mantenido así valores similares, sin embargo, se puede deducir que la adición de agrado de concreto reciclado (ACR) en los diversos porcentajes de modificación no alteran de forma significativa el comportamiento en cuanto al rendimiento relativo de la mezcla de concreto, comportamiento similar al que se evidencia en la alteración de $M_{Teórica}$ y M_{Real} , parámetros que se plantearon anteriormente.

Por último, respecto al contenido de aire de cada una de las muestras, se puede ver plasmado en la tabla 6 que si existe una variación porcentual entre la muestra C+ACR0% respecto al concreto modificado, sin embargo, esta diferencia es negativa ya que se presenta una disminución en el contenido de aire para las 3 mezclas, pero se evidencia más significativo en contraste con la muestra C+ACR20% con una variación de 24% y variaciones de 8.8% y 11.1% para las muestras C+ACR30% Y C+ACR40% respectivamente, es posible mencionar que lo anterior se le puede atribuir a la alteración de la relación agua cemento de la mezcla, ya que, como se mencionó anteriormente la porosidad del material puede alterar este factor, lo que al momento de la fabricación representa alteraciones en la fluidez debido al aire naturalmente atrapado al momento de realizar la mezcla.

Tabla 6
Parámetros Masa Unitaria, Contenido de Aire y Rendimiento

Mezclas	M Teórica (kg/m ³)	M Real (kg/m ³)	Y	
			Volumétrico (%)	a (%)

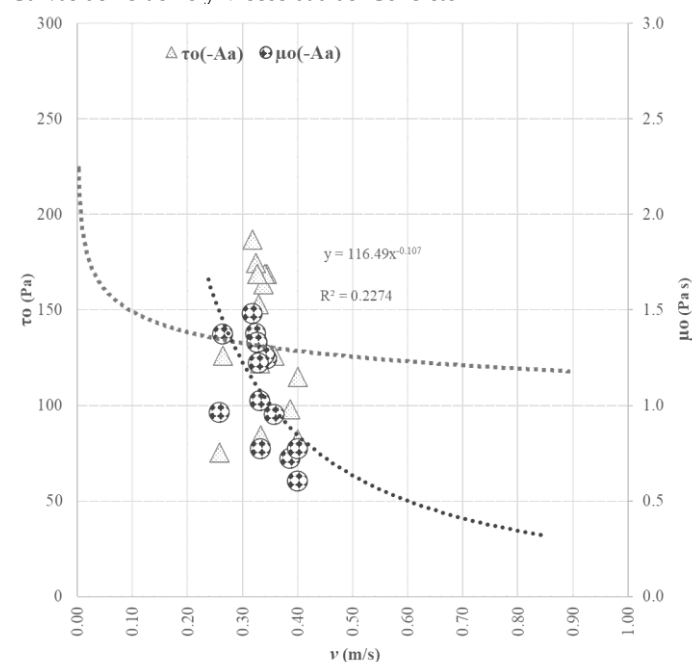
C+ACR0%	2301.32	2679.17	1.16	1.35
C+ACR20%	2292.42	2620.83	1.14	1.02
C+ACR30%	2298.63	2622.22	1.14	1.23
C+ACR40%	2292.52	2620.83	1.14	1.20

Fuente: Autores

Ahora bien, en cuanto a las condiciones de flujo de las muestras, el análisis se realizó por medio de ensayo de t_{50} ; como se observa en la tabla 7, el comportamiento de las muestras en cuanto a el tiempo de flujo y diámetro de deformación, las 4 muestras presentan comportamientos similares arrojando así datos con diferencias poco significativas, sin embargo, es posible evidenciar una leve disminución en el diámetro de deformación entre la mezcla C+ACR0% y C+ACR20%, comportamiento similar ocurre con la muestra C+ACR30%, manteniéndose así este diámetro para el porcentaje de modificación inmediatamente superior.

En cuanto al análisis de la viscosidad plástica de las muestras, se puede evidenciar un notable aumento en cada una de las muestras, se registra un aumento de 44.57% entre la muestra C+ACR0% Y C+ACR20%; este incremento se presenta más marcado en cuanto se analiza la muestra patrón con las mezclas C+ACR30% y C+ACR40%, representando así aumento de 93.5% y 106.73%; teniendo en cuenta lo anterior, se podría inferir que el porcentaje agregado de concreto reciclado ACR influye de manera significativa aumentando el componente viscoso del material. Ahora, en función con la velocidad en la que el fluido alcanza el diámetro final de deformación expuesto en la tabla 7, se puede evidenciar que sin importar el porcentaje de modificación con ACR, la velocidad de flujo no se ve afectada, ya que la variación entre los datos no es representativa presentando un leve aumento como se evidencia en la figura 2, ubicándose así en un rango de datos que varía entre 0.33 y 0.34 m/s.

Figura 2
Curvas de Esfuerzo y Viscosidad del Concreto



Fuente: Autores

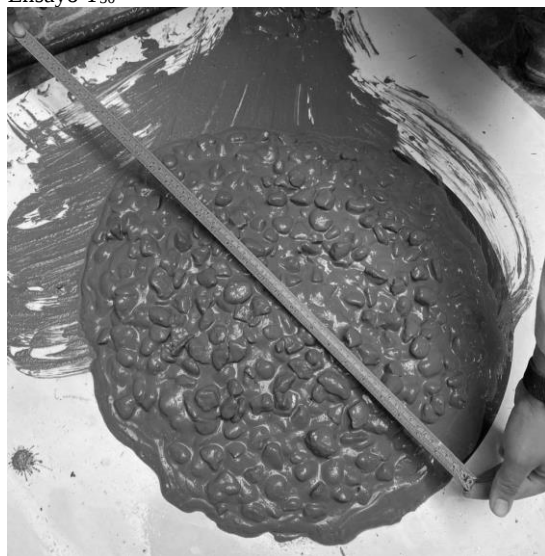
Tabla 7
Ensayo de flujo T₅₀

Mezclas	t ₅₀ (s)	Df (mm)	τ_0 (Pa)	μ_0 (Pa s)	ν (m/s)
C+ACR0%	1.73	0.58	84.53	0.77	0.33
C+ACR20%	1.61	0.53	122.21	1.02	0.33
C+ACR30%	1.49	0.50	163.32	1.24	0.34
C+ACR40%	1.53	0.50	174.49	1.33	0.33

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta lo anterior y realizando un análisis gráfico de lo expuesto en la figura 10, la mezclas de concreto se pueden considerar como un fluido no-newtoniano dilatante según el modelo de Ostwald-de Waele; comportamiento que se le atribuye a la relación de la viscosidad y la velocidad, que presenta el fenómeno de engrosamiento por corte el cual determina que la viscosidad aumenta al igual que la velocidad de flujo, tal y como se mencionó anteriormente en el comportamiento de la viscosidad en cuestión de análisis del ensayo t₅₀ (Figura 3)

Figura 3
Ensayo T₅₀



Fuente: Autores

5. Resultados

5.1 Análisis de resistencia y curado interno del concreto

En la evaluación del comportamiento de las propiedades del concreto al ser modificado con agregado de concreto reciclado (ACR), se encuentra el estudio de la resistencia mecánica que es considerado el factor más importante a evaluar ya que nos define la viabilidad de la implementación de ACR como nuevo material en el sector constructivo en la modificación de concreto; para la presente investigación se realizaron 72 cilindros de concreto con dimensiones de 100 mm de diámetro y 200 mm de alto, las cuales se fragmentaron en 18 cilindros por muestra de concreto.

Tal como se mencionó anteriormente, en el estado del arte se plantea que la resistencia del C+ACR se logra mantener e incluso aumentar

según el porcentaje que se esté adicionando a la mezcla; de esta manera; en este contexto, como se puede evidenciar en la tabla 7, el comportamiento de la resistencia a las edades de 7, 14 y 28 días no es lineal ya que varía de acuerdo a los factores anteriormente mencionados, comportamientos que según los autores, se presentan sin importar el porcentaje de modificación que se está tratando; para el caso puntual, en el comportamiento de la resistencia a compresión de la muestra patrón y las muestras modificadas al día 7, se puede evidenciar que la resistencia real (f'_{cReal}) no presenta variaciones significativas en cuanto las muestras C+ACR20% y C+ACR30%, con respecto a la muestra inalterada, presenta pequeñas diferencias que representan el 5.24% y 7.40%, adicional, se evidencio un aumento de resistencia en el día 7 para la muestra C+ACR40% con valores significativos en cuanto a la muestra patrón, con un aumento en la resistencia del 25.61%, por lo que se podría inferir que en las primeras edades de falla el concreto modificado presenta un leve cambio en porcentajes de modificación bajos (20, 30%), y presenta un pico de ganancia en resistencia para la fecha cuando la modificación supera el 30%.

Lo anterior, se puede observar de manera grafica en la figura 4, en donde se evidencia que las 4 muestras presentan tendencias similares en cuanto a la resistencia alcanzada entre el día de fabricación y la primera fecha de falla, lo mencionado hasta este punto, se logra evidenciar que la muestra C+ACR40%, que sobresale de la línea que siguen las demás muestras, se logra observar el aumento de resistencia que tiene esta muestra en comparación a edades tempranas.

Ahora bien, en cuanto a la resistencia obtenida a los 14 días de falla como se evidencia en la tabla 7, la resistencia de la muestra inalterada C+ACR0% y la muestra de concreto modificada al 30% C+ACR30%, se comportan de manera muy similar, ya que la variación de resistencia entre estas dos muestras no es significativa con un aumento de 0.25%, sin embargo, se observa un comportamiento diferente en cuanto a la resistencia de la muestra C+ACR20% respecto a C+ACR0%, ya que se presenta un aumento más significativo de 12.70%; lo que se logra evidenciar en este caso es que a los 14 días de falla no existe una tendencia lineal en el cambio de las resistencias de las diferentes muestras, ya que se evidencia un aumento en los primeros 7 días y una disminución en el rango de 7 a 14 días de falla.

Por otro lado, siguiendo el comportamiento de la muestra C+ACR40%, se logra evidenciar en la figura 4, que es ésta muestra obtiene mayor resistencia en cuanto a la muestra patrón, ya que el diferencial entre estas equivale al 25.40%, lo que deja en evidencia un comportamiento similar a lo mencionado anteriormente en la resistencia a los 7 días, por lo que hasta este punto se puede inferir que en los primeros 14 días de curado del concreto modificado no se presentan diferencias significativas de disminución de resistencia, en contraste, se evidencia según corresponda la modificación, valores constantes o de ganancia de resistencia para todas las muestras.

Por último, en cuanto a las resistencias al día 28 para todas las muestras hubo comportamientos similares a la tendencia anteriormente mencionada, es importante aclarar que todas las muestras obtuvieron el 100% de su resistencia de diseño al día 28, por lo que se puede inferir que la modificación de concreto con ACR en proporciones inferiores al 50% no afecta de manera negativa el comportamiento del concreto autocompactante en cuanto a resistencia a la compresión.

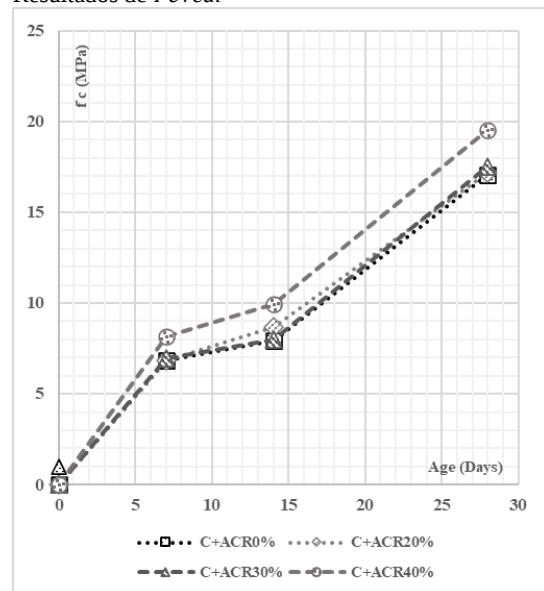
Tabla 8
Resultados de Resistencia a la Compresión para las Mezclas de Concreto

Muestra	$P_{Max.} - 7 \text{ Días}$ (KN)	$f'_{C_{Real}} - 7 \text{ Días}$ (MPa)	Desv. Estándar	%Variación $f'c$	$P_{Max.} - 14 \text{ Días}$ (KN)	$f'_{C_{Real}} - 14 \text{ Días}$ (MPa)	Desv. Estándar	%Variación $f'c$	$P_{Max.} - 28 \text{ Días}$ (KN)	$f'_{C_{Real}} - 28 \text{ Días}$ (MPa)	Desv. Estándar	%Variación $f'c$
C+ACR0%	56.22	6.48	0.60	0	65.30	7.95	0.24	0	126.52	17.05	2.08	0
C+ACR20%	55.70	6.82	0.35	-0.38	65.41	8.96	1.03	9.3	145.65	17.19	1.86	7.3
C+ACR30%	54.48	6.96	0.37	1.17	65.48	7.97	0.19	0.2	146.43	17.52	3.96	10.9
C+ACR40%	66.99	8.14	0.19	18.89	82.03	9.97	0.25	25.4	161.27	19.54	1.17	13.1

Fuente: Autores

En este contexto, se puede observar lo anterior de forma más específica en la tabla 8 y en la figura 4, ya que se logra evidenciar que al día 28 la muestra C+ACR0% en comparación con las dos muestras con porcentajes de modificación más bajos mantienen cifras similares con incrementos poco significativos, la muestra C+ACR20% presenta un aumento del 0.82% tomando como referencia la mezcla de concreto con agregado natural, comportamiento que se asemeja a el resultado de resistencia con la muestra C+ACR30% que obtuvo una ganancia de resistencia de 2.75%; en contraste, como se evidencia en la figura 4, la muestra C+ACR40% presenta una ganancia de resistencia superior a las demás muestras, representando así un aumento de 14.60%, posicionándose de esta forma como la muestra de concreto que obtuvo mayor resistencia en edades donde el concreto alcanza el 100% de su resistencia.

Figura 4
Resultados de $f'_{C_{Real}}$

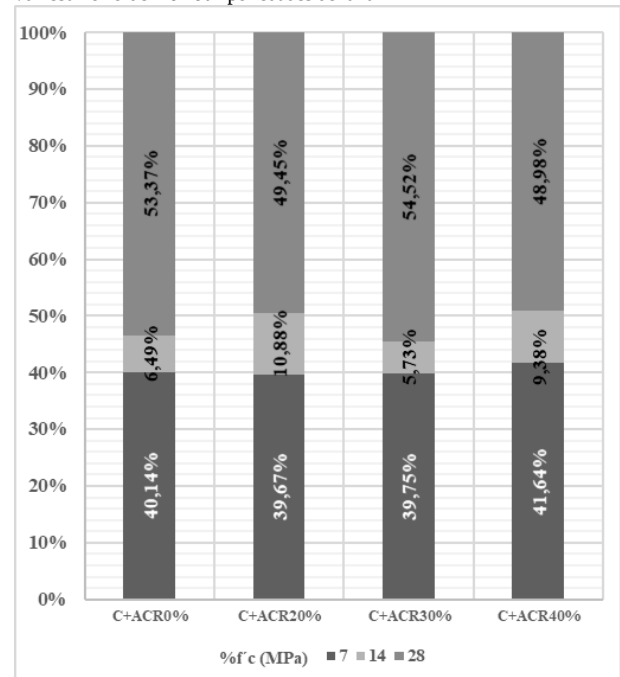


Fuente: Autores

Por otra parte, la figura 5 expone el porcentaje de ganancia de resistencia según la edad de falla de cada una de las muestras,

como se observa, se logra evidenciar que las 3 muestras se comportan de manera similar ya que todas obtienen mayor porcentaje de ganancia entre el día 7 y el día 28, en este contexto, y citando el comportamiento que mencionamos anteriormente, las muestras C+ACR0% y C+ACR30%, presentaron porcentajes de ganancia bastante similares en este último tramo, con varianza entre estas muestras de 1,78, al igual que la similitud en la ganancia de resistencia entre las muestras C+ACR20% y C+ACR40% (Figura 5).

Figura 5
%Desarrollo de $f'_{C_{Real}}$ por edades de falla



Fuente: Autores

Tabla 9
Resultados de I_p y G_c

Muestra	$f'c_m - 7$ Días (MPa)	$f'c_e - 7$ Días (MPa)	$I_p - 7$ Días (%)	$G_c - 7$ Días (%)	$f'c_m - 14$ Días (MPa)	$f'c_e - 14$ Días (MPa)	$G_c - 14$ Días (%)	$I_p - 14$ Días (%)	$f'c_m - 28$ Días (MPa)	$f'c_e - 28$ Días (MPa)	$G_c - 14$ Días (	$I_p - 14$ Días
C+ACR0%	6.84	6.84	0.00	0.00	7.95	7.95	0.00	0.00	17.05	17.05	0.00	0.00
C+ACR20%	6.82	6.82	0.00	0.00	8.69	7.92	9.69	8.83	17.19	16.99	1.19	1.18
C+ACR30%	6.96	6.96	0.00	0.00	7.97	8.09	-1.50	-1.52	15.52	17.35	0.98	0.97
C+ACR40%	8.14	8.14	0.00	0.00	9.79	9.45	5.47	5.19	19.54	20.27	-3.60	-3.74

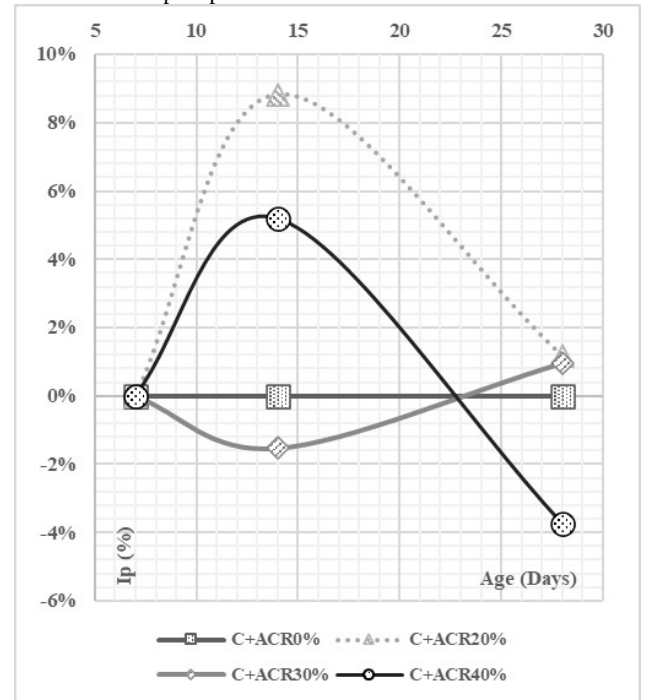
Fuente: Autores

Por último, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la resistencia mecánica de las muestras, se realizó un análisis del índice de ganancia adicional (G_c) y la proporción del curado interno (I_p) expuesta en la tabla 9, como se puede evidenciar, a los 14 días de falla la muestra C+ACR30% presenta una tendencia negativa tal y como se muestra en la figura 6, es la única muestra que a la edad de 7 días presenta una caída en proporción del curado interno, ya que las muestras C+ACR20% y C+ACR40% presentan valores 9.69% y 5.47%, por lo que se podrían igualar al comportamiento de la resistencia mecánica a esta edad, se evidencia un aumento en la muestra C+ACR20%, pero una notable disminución con la muestra modificada al 30%.

Asimismo, en contraste, se puede observar que la muestra C+ACR40% presenta al día 28 un comportamiento negativo en cuanto a el índice de ganancia adicional (G_c) y proporción del curado interno (I_p) con un valor de -3.60% y -3.74% respectivamente, por lo que es acertado afirmar que la muestra C+ACR40% presenta una menor ganancia de resistencia en comparación con las demás muestras modificadas, al ser evaluadas con referencia a la muestra patrón; comportamiento que ya se había evidenciado en la figura 5.

Llegado a este punto es importante mencionar que, en adición a la similitud en la resistencia a la compresión de las muestras, se presenta un comportamiento similar en cuanto al tipo de falla que se presenta (Figura 7). Este tipo de falla considerada falla Tipo C se presentó en la mayoría de los cilindros, lo que se explica con la cercanía de datos y la poca variación en las resistencias en la mayoría de datos evaluados expuestos hasta este punto.

Figura 6
Resultados de I_p respecto a edades de falla



Fuente: Autores

Figura 7
Tipo de falla cilindros de concreto



Fuente: Autores

6. Conclusiones

La presente investigación estudia la viabilidad del agregado de concreto reciclado ACR como material de modificación en las mezclas de concreto autocompactante, lo anterior con el fin de mitigar la contaminación ambiental por parte del sector constructivo en Colombia en términos de desechos y extracción de minerales, en este artículo se evaluó el comportamiento del concreto autocompactante cuando es modificado en su composición natural con agregado de concreto reciclado; en primer lugar, se puede concluir que según lo mencionado en el estado del arte se entiende que el agregado reciclado tiene un porcentaje de absorción bastante alto, en este caso, luego de realizar ensayos de absorción del material se concluye que el agregado utilizado en esta investigación tiene un porcentaje de absorción de 4.4%, valor que se encuentra dentro del rango mínimo permitido por la NTC 174, por lo que se determina que la absorción de agua no genera cambios significativos en el comportamiento de las mezclas en estado fresco.

Por otra parte, en términos de resistencia mecánica, se concluye que, la adición de agregado grueso reciclado ACR en proporciones de 20%, 30% y 40%, no afecta de manera negativa en la resistencia a la compresión, ya que como se mencionó anteriormente, existe una baja diferencia entre las resistencias con modificación del 20% y 30% en comparación con la muestra patrón, asimismo, se concluye que la muestra con el 40% de modificación aumenta de manera significativa la resistencia a los 28 días, por lo que como principal resultado de esta investigación se obtiene que es posible adicionar agregado de concreto reciclado en las proporciones estudiadas en el presente documento, sin que esto disminuya la resistencia a la compresión al día 28, en contraste, la resistencia aumenta en diversas proporciones.

Pese a lo anterior, es válido mencionar que la implementación de agregado de concreto reciclado en el sector de la construcción

sin importar la proporción que se utilice, esta acción contribuirá a la mitigación efectiva y la reducción de desechos producidos por el mismo sector, generando así prácticas sostenibles con segundo ciclo de vida a materiales que hasta hace algunos años fueron considerados elementos sin posibilidad de reutilización.

Por último es válido mencionar que, para futuras investigaciones teniendo en cuenta que la resistencia no se ve afectada de manera negativa, en cambio se vio una mejoría con el porcentaje más alto, a pesar de que las investigaciones citadas en el presente artículo mencionen que es óptima la modificación inferior a 50%, es acertado plantear la posibilidad de realizar una segunda investigación o un complemento del presente artículo en donde se amplíe el porcentaje de modificación de 0 a 100% para que de esta manera se tenga certeza de que existe una manera efectiva de modificar concreto y contribuir a la mitigación de la contaminación ambiental por parte del sector de la construcción como lo conocemos actualmente.

7. Referencias Bibliográficas

- [1] DANE “Censo Nacional de Población y Vivienda 2018,” COLOMBIA POTENCIA DE VIDA. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018>
- [2] D. Valencia, “Migración Colombia: requisitos, cómo hacer el Registro Único de Migrantes Venezolanos y cuándo acaba el plazo,” AS Colombia. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://colombia.as.com/colombia/2021/05/07/actualidad/1620409597_943149.html
- [3] Departamento nacional de planeación, “Expansión urbana ordenada,” Bogotá, 2020.
- [4] CAMACOL, “PIB de edificaciones creció 11,8% en el 2022.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://camacol.co/actualidad/noticias/PIB-edificaciones#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Dane,%2C%20con%2011%2C8%25>.
- [5] CAMACOL, “Proyección sectorial: PIB edificador 2023,” CAMACOL INFORMA. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://camacol.co/descargable/proyeccion-sectorial-pib-edificador-2023>
- [6] DANE, “Estadísticas de Licencias de Construcción,” DANE. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/licencias-de-construccion>
- [7] DANE, “Estadísticas de Concreto Premezclado (EC),” COLOMBIA POTENCIA DE LA VIDA. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado>

- [8] SIMCO, “Materiales de Construcción,” Unidad de planeación minero energética. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/materialesdeconstruccion.aspx>
- [9] ANM, “Así es nuestra Colombia minera,” AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera>
- [10] Benito, Luis, “Minería ilegal en Colombia: estos son los cinco criminales más buscados por la explotación ilícita de oro,” infobae. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.infobae.com/colombia/2023/11/30/mineria-ilegal-en-colombia-estos-son-los-cinco-criminales-mas-buscados-por-la-explotacion-ilicita-de-oro/>
- [11] M. Bustillo Revuelta, “LOS RECURSOS MINERALES Y LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Mineral Resources and Construction Materials Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,” 2008.
- [12] D. de Santos Marián, B. Monercillo Delgado, A. García Martínez, and Fundación Laboral de la Construcción (España), *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. Tornapunta, 2011.
- [13] MITECO, “Tierras y escombros (RCD),” VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO. Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujo/tierras-y-escombros.html>
- [14] Rodríguez Lozano, Fabian Mauricio, Teran Castro, and Cesar Leonardo, “Formulación de un plan de gestión para el uso de agregados de concreto reciclado en concretos hidráulicos para una empresa constructora en la ciudad de Bogotá,,” Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2018.
- [15] Secretaría Distrital de Ambiente, “Lineamientos de la política de RCD en Bogotá.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.ambientebogota.gov.co/residuos-de-construccion-y-demolicion>
- [16] SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, “GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN - RCD EN LA OBRA,” 2015.
- [17] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 7, pp. 1129–1133, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029.
- [18] C. Sun, Q. Chen, J. Xiao, and W. Liu, “Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 161, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104930.
- [19] R. Mandal, S. Kumar Panda, and S. Nayak, “Evaluation of the rheological properties of self-compacting recycled aggregate concrete,” *Mater Today Proc*, vol. 93, pp. 170–175, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.114.
- [20] Z. Duan, A. Singh, J. Xiao, and S. Hou, “Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 254, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119323.
- [21] I. B. Topcu, “PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETES PRODUCED WITH WASTE CONCRETE,” 1997.
- [22] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 121,” 1982.
- [23] “NTC 221 - Densidad del Cemento,” 2011.
- [24] A. De, B. De Permeabilidad, and A. L. Aire, “NTC 33 METODO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRÁULICO POR MEDIO DEL.”
- [25] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 110 MÉTODO PARA DETERMINAR LA CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO HIDRÁULICO E: STANDARD TEST METHOD FOR NORMAL CONSISTENCY OF HIDRAULIC CEMENT CORRESPONDENCIA: esta norma es una adopción modificada (MOD) de la norma ASTM C187:04,” 2008.
- [26] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 118 E: STANDARD TEST METHOD FOR TIME OF SETTING OF HYDRAULIC CEMENT BY VICAT NEEDLE CORRESPONDENCIA: esta norma es una adopción idéntica (IDT) por traducción de su documento de referencia, la norma ASTM C 191-2004 Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle,” 2004.
- [27] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 174.”
- [28] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 77 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS E: STANDARD TEST METHOD FOR SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES CORRESPONDENCIA: esta norma es equivalente a la ASTM C 136-92,” 1994.
- [29] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 176 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO E: STANDARD TEST METHOD FOR SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF COARSE AGGREGATE CORRESPONDENCIA: esta norma es equivalente (EQV) a la ASTM C127-93,” 1995.
- [30] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 237 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO E: STANDARD TEST METHOD FOR SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF FINE AGGREGATE CORRESPONDENCIA: esta norma es equivalente (EQV) a la ASTM C128-93,” 1995.
- [31] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 1776 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR POR SECADO EL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS E: STANDARD TEST METHOD FOR TOTAL MOISTURE CONTENT OF AGGREGATE BY DRYING CORRESPONDENCIA:

- esta norma es equivalente a su antecedente ASTM C566-89,” 1994.
- [32] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 92 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS E: STANDARD TEST METHOD FOR UNIT WEIGHT AND VOIDS IN AGGREGATES CORRESPONDENCIA: esta norma es idéntica a la ASTM C29M-91a,” 1995.
- [33] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 93 INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS GRUESOS MAYORES DE 19 mm, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES E: STANDARD TEST METHOD FOR RESISTANCE TO DEGRADATION OF LARGE-SIZE COARSE AGGREGATE BY ABRASION AND IMPACT IN THE LOS ÁNGELES MACHINE CORRESPONDENCIA: esta norma es equivalente a la ASTM,” 1995.
- [34] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 127 E: CONCRETES. STANDARD TEST METHOD FOR ORGANIC IMPURITIES IN FINE AGGREGATES FOR CONCRETE CORRESPONDENCIA: esta norma es equivalente (EQV) a la norma ASTM C 40,” 2000.
- [35] “ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS.”
- [36] “E-227 Instituto Nacional de Vías.”