

Factibilidad del remplazo de agregados finos reciclados de demolición en las propiedades físicas de concreto estructural

Lucio G. López-Yépez^A, Ricardo A. Bermúdez^B,
Sandra L. Uribe-Celiz^B, Sandra E. Ospina-Lozano^B,
Francisco J. Vázquez-Rodríguez^C

^AUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

^BUniversidad de la Salle, Grupo de investigación Ingetec, Bogotá, Colombia.

^CUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Arquitectura, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
guiloyez@gmail.com, fcofimeuanl@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se estudió el reemplazo de agregados reciclados y su efecto en la durabilidad, mediante el ensayo de migración de iones cloruro (NordTest 492) y el desarrollo de resistencia del concreto utilizando remplazos de 30%, 50%, 75% y 100% de la fracción fina de los agregados. Los resultados mostraron que es factible el desarrollo de resistencias en concretos con reemplazos de 30% y 100%, del agregado normal por agregado fino reciclado; los porcentajes de reemplazo influyeron en la absorción capilar y en la migración de iones cloruro, modificando el comportamiento ante pruebas de durabilidad.

PALABRAS CLAVE

Residuos de demolición; cloruro, durabilidad, concreto.

ABSTRACT

In this work, the replacement of recycled aggregates and its effect on durability were studied through the chloride ion migration test (NordTest 492) and the development of concrete strength using replacements of 30%, 50%, 75% and 100% of the fine fraction of the aggregates. The results showed that it is feasible to develop resistances in concrete with 30% and 100% replacements, from normal aggregate to recycled fine aggregate; the replacement percentages influenced the capillary absorption and the migration of chloride ions, modifying the behavior before durability tests.

KEYWORDS

Recycled aggregates, chloride, durability, concrete.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de la construcción alrededor del mundo se encuentra en busca de alternativas sostenibles para el desarrollo de metodologías y normativas que contribuyan al mejoramiento de la calidad en el medio ambiente.

Para alcanzar este objetivo es de suma importancia apegarse a las políticas ambientales regulatorias de los países. En años recientes han elaborado protocolos para la gestión de *Residuos de Demolición y Construcción por su siglas en inglés (C&DW)*. El origen de los residuos de demolición es debido a edificaciones deterioradas, remodelación de infraestructura antigua con deterioro estructural, o por acontecimientos naturales como incendios, inundaciones o terremotos. En la unión europea son generados aproximadamente 850 millones de toneladas de desechos de construcción, que representa un 31% del total de residuos generados. Mientras que en los Estados Unidos, se estima una producción de residuos de demolición en 123 millones de toneladas anuales.^{1,2}

En países latinoamericanos con economías emergentes, que actualmente desarrollan complejos inmobiliarios e infraestructura de urbanización, tales como Colombia y México, en estos últimos años se han dado a la tarea de también dar rehúso a dichos subproductos. En México los residuos de demolición han sido el tercer mayor rubro de generación de desechos del país, en el año 2006 hasta el 2012. A partir de 2013 se gestionan los residuos de acuerdo a la normativa NOM-161-SEMARNAT-2011, la cual los clasifica como residuos especiales, esto obliga a darles un buen tratamiento o rehusarlos.³

En la Ciudad de México algunas empresas procesan el 3% de los residuos generados, que son aproximadamente 2,000 toneladas diarias y sólo un 30% se emplea como agregados y gravas para concreto premezclado. En Bogotá Colombia en los últimos años, se ha incrementado el desarrollo constructivo y con ello, la generación de desechos debido al aumento del 20 al 30% del PIB de la construcción colombiana, actualmente se producen tan sólo en la capital colombiana, cerca de 15 Millones de toneladas anuales de C&DW.⁴

En ese sentido, el estudio de los efectos del residuo de demolición de concreto (RCA) cuando este es utilizado como agregado fino y grueso, ha venido siendo objeto de estudio a nivel mundial, tanto desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, módulo de rotura, módulo de elasticidad) como desde su durabilidad, es así como se ha establecido que en el caso del agregado grueso reciclado de concreto (AGR), el cambio de tamaño máximo nominal de 7 mm a 12 mm, produce una disminución de la resistencia a la flexión (módulo de ruptura), pero conduce a un incremento en el valor del módulo de elasticidad (E).⁵ Para estas mismas propiedades, el efecto del (AGR) sobre el Módulo de ruptura puede producir reducciones de hasta del 10%, respecto a los valores obtenidos en muestras de concreto con agregado natural, que a medida que se incrementa el nivel de reemplazo, el (E) puede reducirse hasta un 45%. Reemplazos entre el 50 y 100% de (RCA) pueden disminuir la resistencia a la compresión de 5 a 25%, Por lo tanto los reemplazos no deberían elevarse a más de un 30%.⁶ Por otro lado se habla del caso de los agregados finos reciclados de concreto (AFR), estos generalmente no deben ser utilizados en la producción de concreto estructural,⁷ debido a que la alta porosidad de la fracción fina, puede conducir a reducciones en las propiedades del material que lo contenga.⁸

Hoy en día el objetivo de la mayoría de los diseños de mezcla de concreto se enfoca en producir un material que tenga una buena trabajabilidad, resistencia, durabilidad y sostenibilidad. Para cumplir con esto, en los concretos con agregados reciclados se deben tener en cuenta aspectos tales como, la alta porosidad de los

agregados, la posible fisuración de las partículas y la debilidad en la zona ITZ (interfacial transition zone) entre la pasta-agregado.⁹ Dichos factores pueden afectar el material tanto en estado fresco como endurecido produciendo concretos poco resistentes y durables si no se toman las debidas medidas del caso. De acuerdo a lo anterior uno de los caminos para lograr subsanar los problemas inherentes al uso del RCA sería la adopción de metodologías de mezclado diferentes a las del concreto tradicional.

Para el caso de esta investigación se escogió la metodología “enfoque de mezclado en dos tiempos” (TSMA) desarrollada por Tam,¹⁰ este busca dividir el mezclado en dos etapas, fraccionando la adición del agua requerida en dos partes, tal y como a continuación se describe: primero se mezclan los agregados gruesos, finos y el cemento con la mitad del agua necesaria, tal y como se describe en la (figura 1). Este proceso conduce a la formación de una capa delgada de lechada de cemento, que cubre superficialmente el RCA, mejorando así la calidad del mismo debido a que dicho recubrimiento penetra en los poros del mortero viejo, llenando los vacíos y las grietas del agregado reciclado. Por último, se adiciona el agua restante y se mezcla por 120s para completar el proceso de mezclado.^{9,10}

La durabilidad en el concreto, es la habilidad del material para resistir diversos efectos de origen ambiental, químico, físico o mecánico, sin que se pierdan su calidad y condiciones de uso durante su periodo de servicio. Este concepto se hace importante a la hora de evaluar el comportamiento del concreto reciclado, fabricado con altos volúmenes de remplazos en el agregado fino, ya que se convierte en una medida del desempeño del material, cuando este vaya a ser utilizado en la construcción.

El objetivo de este trabajo es aplicar una metodología de remplazo de agregados finos procedentes de demolición y determinar el efecto de estos, en las propiedades físicas del concreto.

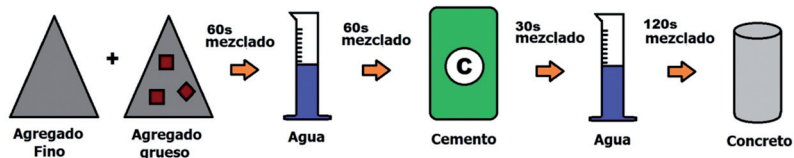


Fig. 1. Metodología de mezclado de concreto con agregados reciclados TSMA.¹⁰

MATERIALES Y MÉTODOS

Propiedades del cemento y morteros de control

En este trabajo se utilizaron como materias primas: agregado fino normal #4 (NFA), agregado grueso normal (NCA) y cemento portland tipo I, con una densidad de 2.99 g/cm^3 y tiempos de fraguado inicial= 140 minutos y final= 200 minutos. La trabajabilidad se midió mediante la prueba de fluidez 108.5 mm basados en ASTM C230 -14 (Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement), La resistencia a la compresión se realizó en base a lo recomendado por ASTM C109 -16 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) en cubos de 5cm x 5cm x5cm los valores fueron de 12 MPa a 3d, 17 MPa a 7d y 25 MPa a los 28d .

Metodología de remplazo de los agregados

Se usaron agregados finos de peso normal y agregados reciclados, el agregado grueso normal (NCA) con tamaño máximo de 19 mm, agregado fino normal (NFA) y agregado fino reciclado (RFA) proveniente de plantas de demolición. Estos materiales presentaron las propiedades mostradas en la tabla I

Tabla I. Propiedades de los Agregados.

Agregado	Agregado grueso	Agregado fino normal	Agregado fino reciclado
Tamaño máximo (mm)	19.5	-	-
Tamaño máximo nominal (mm)	12.5	-	-
Módulo de Finura	-	2.3	3.1
Peso seco (g/cm ³)	1.5	1.4	1.4
Peso varillado seco (g/cm ³)	1.7	1.5	1.6
Pérdida por abrasión (%)	19.1	-	-
Gravedad específica a granel (g/cm ³)	2.4	2.5	2.5
Absorción (%)	3.5	3.7	6.4
Humedad superficial (%)	1.8	4.4	10.1

Se realizó el ensaye para determinar la humedad de los agregados finos de acuerdo a ASTM C70-13 (Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate) y ASTM C 127-15 Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and ASTM C 128-04 Absorption of fine and Coarse Aggregate. El análisis de las curvas granulométricas de los agregados se muestra en la (figura 2).

El control del remplazo del NFA por RFA, se realizó aplicando una nueva metodología, la cual se basa en la división de la curva granulométrica recomendada por la ASTM C 33-18 (Standard Specification for Concrete Aggregates) en tres zonas granulométricas (figura 3) Zona 1 (Arena Fina), Zona 2 (Arena Media) y Zona 3 (Arena Gruesa).

Los agregados se clasificaron de la siguiente manera: se retiró de los agregados finos NFA y RFA la fracción retenida en el tamiz No.4 y el material pasante en el tamiz No.200, con la finalidad de uniformizar la fracción fina. De los agregados a utilizar como materia prima para hacer concreto, Se extrajeron los porcentajes 30%, 50%, 75% y 100% de los NFA, dicho porcentaje se pesó para remplazar el mismo valor de peso por RFA.

Después se dividió el agregado fino natural, tamizándolo en la malla número 4, número 10, número 40 y número 200 clasificando cada una de las zonas como Zona 1= No.4 al No.10, Zona 2 = No.10 a la No.40, Zona 3= No.40 a la No.200. Se pesó el NFA retenido en cada una de la zonas (franjitas) y se remplazaron exactamente los pesos de los agregados extraídos por RFA, con el objetivo de mantener la granulometría del NFA al momento de remplazarlo

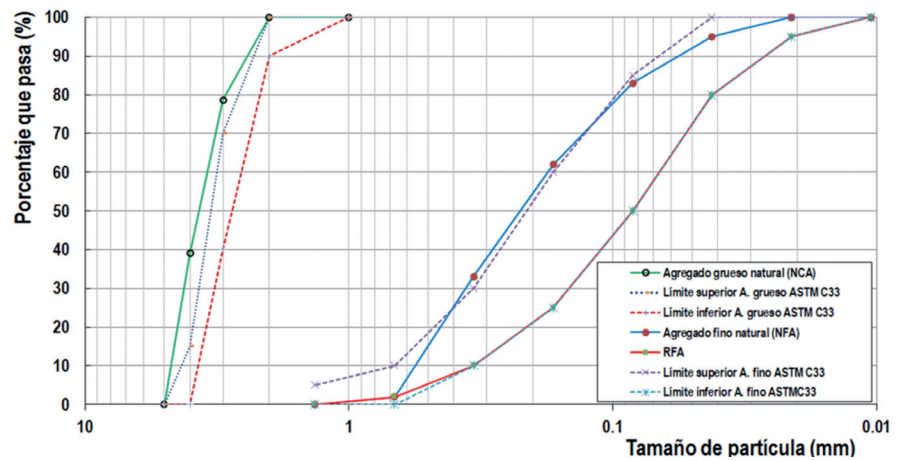


Fig. 2. Curva granulométrica de agregados reciclados para concretos.

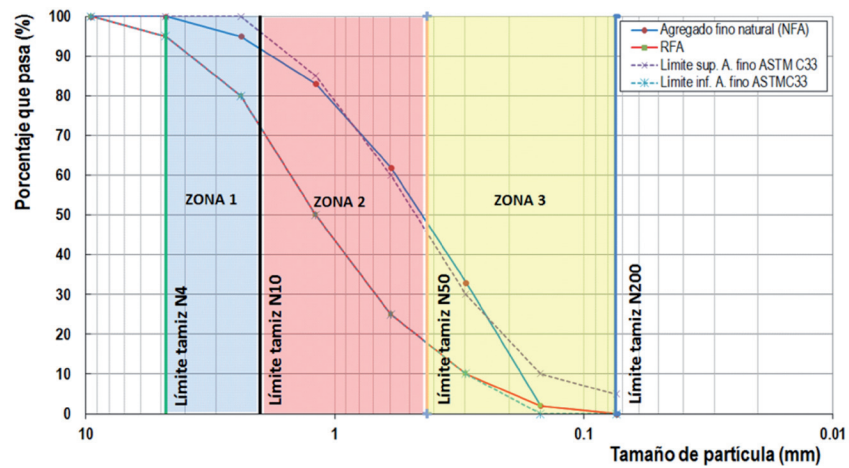


Fig. 3. Separación de curvas granulométricas de agregados normales.

por RFA. Finalmente al realizar los remplazos para cada mezcla de concreto, se homogenizaron los agregados RFA remplazados con NFA. Se debe tener en cuenta que para analizar el efecto total de los finos en la matriz de concreto se retiró la fracción fina No.4 del agregado grueso, quedando únicamente el tamaño 4.76 mm de los NFA.

Proporcionamiento de las mezclas de concreto

Para el diseño de la mezcla de concreto se consideró que los agregados reciclados no cumplen con lo descrito en **ASTM C33** (Standard Specification for Concrete Aggregates), debido a esto no se diseñó mediante **ACI 211.1** (Design of concrete mixtures). razón por la cual se diseñó bajo el procedimiento **Road Note Laboratory (RNL)**, el cual describe de manera gráfica, un procedimiento para definir la cantidad de finos y gruesos en la mezcla de concreto. Para este estudio se proporcionó un volumen de agua = 205 L/m³, Volumen de cemento= 0.17 m³, y aire incluido del 2%. Para el caso del volumen de agregados mediante el método grafico, se obtuvo un porcentaje de finos y gruesos referido al total de

áridos de 41% y 59% respectivamente. Al tener los porcentajes de agregados se procedió a obtener los pesos finales mediante la modificación de la ecuación de la densidad promedio, descrita en la ecuación 1, en la cual se incluye el efecto de la densidad de los agregados reciclados. El cálculo de esta ecuación permite obtener los pesos finales de los agregados finos y gruesos para cada uno de los remplazos estudiados.

$$\rho_a = \frac{\rho_{ca}[(\%nfa)(\rho_{nfa})+(\%rfa)(\rho_{rfa})]}{[(\rho_{ca})\eta + (\%nfa)(\rho_{nfa}) + \%rfa(\rho_{rfa})(m)]} \quad (1)$$

Donde:

ρ_a es densidad aparente de los agregados (gr/cm^3);

ρ_{ca} es densidad aparente del agregado grueso (gr/cm^3);

ρ_{nfa} equivale a densidad aparente del agregado fino normal (gr/cm^3);

ρ_{rfa} significa densidad aparente del agregado fino reciclado (gr/cm^3);

$\%o_{rfa}$ es porcentaje de agregado fino reciclado.

$\%o_{nfa}$ es porcentaje de agregado fino natural.

η es la proporción de agregado fino.

m es la proporción de agregado grueso

Procedimiento de mezclado

Según el proporcionamiento, se dosificaron los agregados para los diversos sistemas de mezclas de concreto, donde se reemplazaron los NFA por RFA.

Por último, se homogenizaron ambos agregados finos (NFA y RFA) con la finalidad de tener una mejor distribución de granos al momento del amasado de los concretos. Una vez obtenidos los pesos finales de cada uno de los componentes, se procedió a amasar el concreto, siguiendo la metodología de amasado **TSMA** descrita por Tam.⁹ Se hicieron 30L por cada mezcla. Posteriormente se hicieron muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, siguiendo **ASTM C31-18** (Standard Practice For Making And Curing Concrete Test Specimens In The Field). Después de cumplirse la primeras 24h de pre-curado, las muestras se curaron sumergidas en agua 56 días a una temperatura de 25°C y una concentración de agua con cal de 2g/L, hasta los ensayos de compresión, migración de cloruros y sorptividad.

Para determinar las propiedades de los concretos elaborados se hicieron mezclas siguiendo **ASTM C 192-16** (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory) utilizando una relación agua/cemento =0.485. Para el mezclado del concreto se utilizó una mezcladora de concreto de 90L con motor eléctrico de 3 H.P. 220V /60Hz.

ENSAYO AL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico se evaluó mediante la resistencia a la compresión, tracción indirecta y módulo de rotura. La resistencia a la compresión simple es una de las características físico-mecánicas principales del concreto, como

se mencionó anteriormente, es necesario evaluarla, pues se ha encontrado en diferentes investigaciones, que altos porcentajes de remplazo de agregado natural por agregado reciclado conllevan a la disminución significativa de la resistencia del concreto. En ese sentido, para esta investigación se siguieron las indicaciones descritas en la **ASTM C39-18** (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens), norma que indica la manera de obtener esta propiedad con base a la ecuación de esfuerzo normal, de igual forma para obtener las otras propiedades mecánicas del material se siguieron los procedimientos correspondientes de acuerdo a las **ASTM C 496-17** (Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens) y **ASTM C78-18** (Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading))^{16,17}

Ensayos de durabilidad

Para determinar la durabilidad de los concretos hechos con RFA, se hicieron pruebas de durabilidad tales como el coeficiente de migración de cloruros mediante la normativa NT 492, la sorptividad que es la medida de la capacidad del concreto para adsorber y desorber líquidos por capilaridad siguiendo **ASTM C 1585-13** (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes) y resistividad.

Ensayo de migración de cloruros en estado no estacionario

El Nordtest Method NT build 492 (Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments), es un procedimiento para calcular el coeficiente de migración de iones cloruros en el concreto endurecido, mecanismo inducido mediante transporte por electro-migración; los valores de coeficientes calculados por este método son medidas de la resistencia del concreto al ingreso de iones cloruro.¹¹ Es de suma importancia aplicar este método de durabilidad, para determinar si el concreto con agregado reciclado, elaborado en este trabajo, presenta niveles de deterioro importantes si se expone ante agentes nocivos, a sabiendas de que el mecanismo de deterioro por migración de iones cloruro está catalogado como el más perjudicial para estructuras de concreto armado, debido a su alta capacidad de difusión, a través de la matriz porosa del concreto en estado endurecido.

Para la obtención de los coeficientes de migración de cloruros en los concretos con agregado reciclado, se siguió el procedimiento de la normativa **NT Build 492**¹². Donde se indica el ensayo de probetas de concreto de 5 cm±2 de alto por 10 cm de diámetro, las cuales se colocan en un ducto de caucho dentro de un recipiente con una solución de 10% de NaCl en la parte externa del ducto y de 0.3 N de NaOH en el interior de la manguera de caucho (figura 4), una vez definido el montaje, se suministró un voltaje de 30V a las probetas para conocer el tiempo de ensayo y la carga eléctrica que obligará la electro migración de los iones cloruros hacia las probeta.

Una vez cumplido el tiempo de ensayo, las muestras se someten a tracción indirecta con el objeto de dividirla en dos partes, finalmente a una de estas mitades se le adiciona nitrato de plata en la zona expuesta a la concentración de NaCl,

con el fin de observar el perfil de penetración de cloruros. Con el dato promedio de la penetración se obtiene el coeficiente de migración de cloruros según la ecuación 2. Para la cual D_{nssm} es el coeficiente de migración para el estado no estacionario ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$); L es el espesor de la muestra (mm); X_d el Promedio de la profundidad de los perfiles de penetración (mm); U : el Valor absoluto del voltaje aplicado (V); T el Promedio de la temperatura inicial y final del anolito ($^{\circ}\text{C}$) y t es tiempo de duración del ensayo (h).

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (2)$$

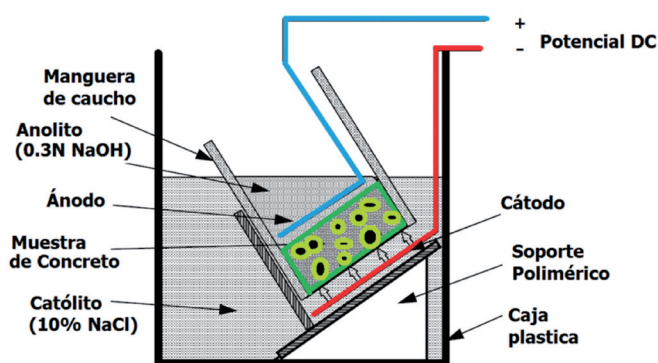


Fig. 4. Diagrama experimental del ensayo NT built 492.¹²

Sorptividad: adsorción y desorción capilar

La sorptividad se determina como una propiedad intrínseca del material el cual tiende a absorber y transmitir agua por succión capilar por su porosidad,¹³ con este método se determinó la tasa de absorción de agua a partir del incremento de la masa de la probeta por absorción, al estar en contacto el concreto con agua a través del tiempo. El ensayo se realizó siguiendo la normativa **ASTM C1585-13** (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes),¹⁴ la cual consiste en utilizar una muestra de 5 cm de altura por 10 cm de diámetro. La preparación de la muestra antes del ensayo se realizó siguiendo el procedimiento de la **ASTM 1202-12** (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration), b) Medir la masa de la probeta, c) Colocar las muestras en un desecador dentro de un horno de secado una temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante tres días controlando la humedad relativa con bromuro de potasio evitando siempre que las probetas entren en contacto con la solución la cual debe estar en una concentración de 80.2 g/0.1 L de agua, d) Dejar las probetas en un contenedor por 15 días a una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e) Sacar las probetas del contenedor y tomar el diámetro promedio de la cara a exponerse y la masa de la mismas con una aproximación de 0.01 g, para después sellar las superficie lateral de la probeta, f) finalmente se coloca la muestra sobre un superficie de agua de 1 a 3 mm y se comienza a medir la ganancia de peso respecto al tiempo (figura 5)

La sorptividad se calculó mediante la ecuación 3, en donde la S es la medida de sorptividad en (mm/s^{1/2}); Q es el volumen de agua penetrada en mm³; A es al área de la superficie expuesta al flujo uniaxial (mm²); y t es el lapso de tiempo en minutos.

$$S = \frac{Q}{A \cdot \sqrt{t}} \quad (3)$$

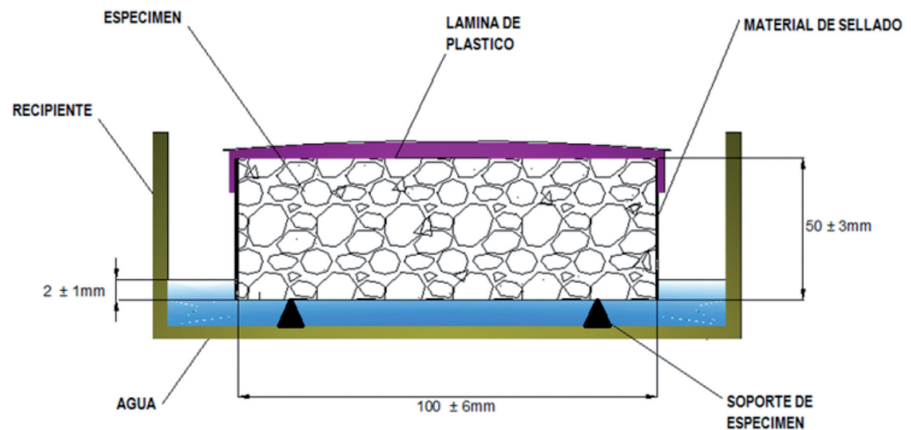


Fig. 5. Diagrama esquemático del ensayo ASTM C 1585.¹⁴

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades mecánicas

Se aplicó la metodología de remplazo de agregados propuesta en la experimentación, los resultados de los concretos con remplazos de NFA por RFA en 30%, 50%, 75% y 100% presentaron buenas propiedades mecánicas a compresión. La mezcla con 30% RFA desarrolló 46 MPa de resistencia, un 6% menos respecto a la mezcla sin remplazo de agregado la cual desarrolló 49 MPa a los 56 d. La mezcla con 50% RFA desarrolló 43 MPa, un 12% menos que la mezcla de concreto sin remplazo (100% NFA) y las mezclas con remplazos del 75% RFA y 100% RFA desarrollaron valores de resistencia de 40 MPa un 18% menor que las mezclas sin sustitución de agregados. Entre las mezclas con 30% RFA y 50% RFA hubo una variación de resistencia del 7% y en las mezclas de 75% RFA y 100% RFA una variación menor al 1%. La mayor variación de resistencia a compresión se presentó en los concretos con mayores cantidades de remplazo de agregados (75% RFA y 100% RFA) y fue de aproximadamente un 20% en detrimento respecto a la mezcla de concreto sin sustitución de agregados. En cuanto a la resistencia a la flexión en las mezclas sin remplazo 100% NFA los concretos desarrollaron 46 MPa. Las mezclas con 30% RFA desarrollaron 35 MPa un detrimento del 22% respecto a las mezclas 100% NFA. Las mezclas con 50% RFA desarrollaron 29 MPa mostrando un detrimento 35% respecto a las mezclas sin remplazo de agregados, las mezclas con 75% RFA de remplazo presentaron valores de 24 MPa un 47% menor respecto a la mezcla sin remplazo de agregados. Mientras que la mezcla 100% RFA desarrolló 18 MPa un 60% menos que la mezcla 100% NFA.

En la tracción indirecta las variaciones de los resultados se encuentra un 7.5% en los diferentes valores de remplazo de agregados. Si se analiza cada una de las propiedades mecánicas, se deduce que niveles de reemplazo de 100% afectan la resistencia con valores aproximados a la compresión 20%, la tracción indirecta en un 30% y la resistencia a la flexión un 20%. Cabe destacar si se reduce este reemplazo a la mitad en el NFA la disminución en estas propiedades están del orden del 12%, 17% y 14% respectivamente.

En la figura 6 se muestra el comportamiento mecánico de los concretos a diferentes niveles de remplazo de agregados.

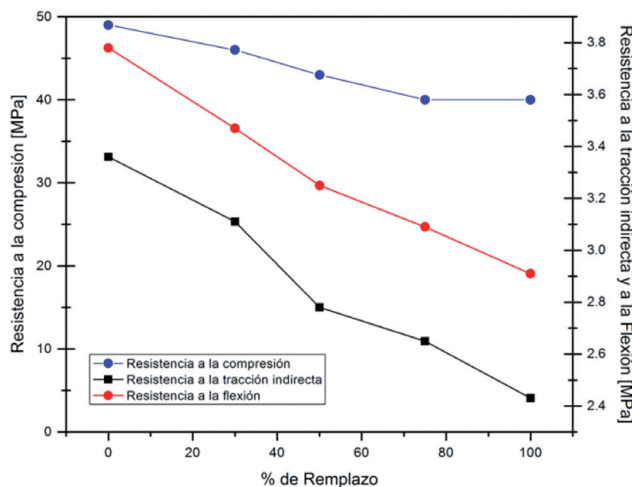


Fig. 6. Comparativa de resistencia a compresión y flexión en concretos elaborados.¹⁷

Migración de cloruros

Siguiendo la metodología del Nord Test 492, (figura 7) se obtuvieron los coeficientes de migración de cloruros, los resultados mostraron una tendencia de incremento a medida del aumento de remplazo de RFA. La alta porosidad de los RFA hace que los concretos elaborados con remplazos sean más propensos a la migración de iones cloruro.

Esto se comprobó con la evaluación de concretos con diferentes porcentajes de sustitución de agregados. Los resultados de los coeficientes de migración cloruros son altos cuando se realizan en reemplazos mayores al 50%. 1.8×10^{-11} para un 75% de remplazo y 2.10×10^{-11} para remplazos del 100%. Se recomienda que para concretos expuestos a ambientes ricos en cloruros la sustitución no sea mayor al 30% de los agregados finos. Con 30% de RFA el coeficiente migración es de 1×10^{-11} , esto reduce un 23% de ingreso respecto a la sustitución de 50% de RFA, un 47% respecto al 75% de sustitución de RFA y 52% de reducción de ingreso de cloruros respecto a los concretos elaborados con 100% de RFA. (figura 8).

La porosidad en los agregados de remplazo son un factor a considerar en el ingreso de iones cloruro a través de la matriz cementante de los concretos elaborados con agregados reciclados, la durabilidad de concretos elaborados con RFA puede estar influenciada por variables como porosidad de los agregados, interfase agregado-pasta y porosidad de la matriz cementante, estas variables pueden disminuirse empleando cementantes suplementarios tales como escorias

o cenizas volantes que ayuden a formar geles de hidratación por su hidraulicidad o potencial puzolanico y que funcionen como relleno.

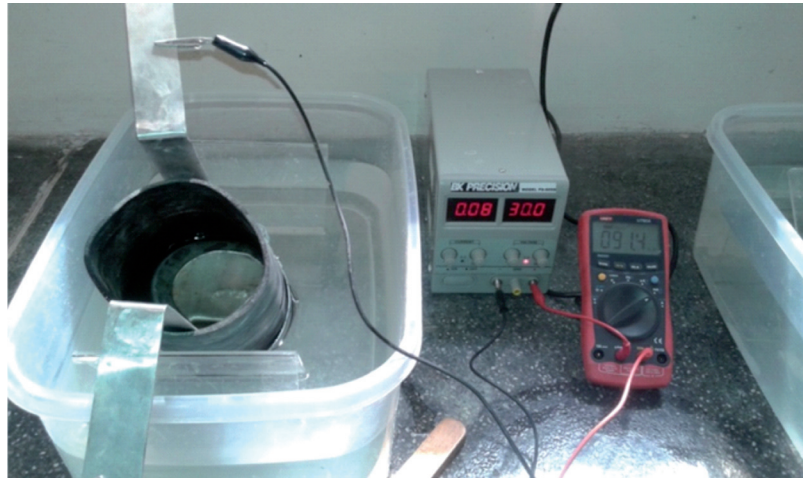


Fig. 7. Método de ensayo de la prueba Nordtest 492.

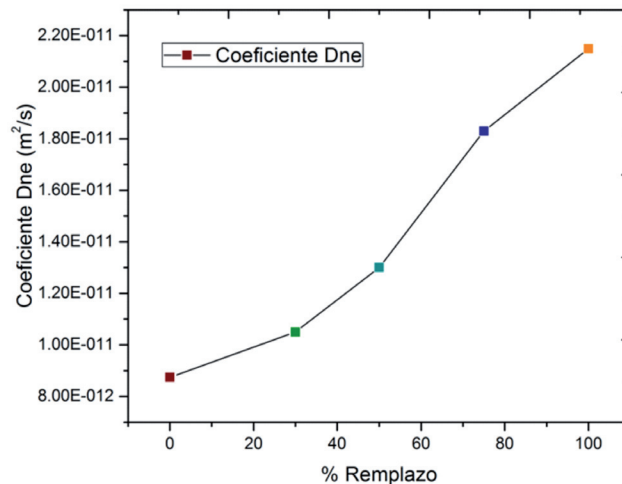


Fig. 8. Resultados para Dne en concretos con diferentes cantidades de remplazo.

Ensayo de Sorptividad

Los resultados de la evaluación de sorptividad en los concretos con agregados reciclados, muestran el efecto del reemplazo a diferentes porcentajes sustitución de NFA por RFA en la permeabilidad al agua. Los resultados obtenidos mediante este ensaye muestran el mismo comportamiento observado en el ensayo no estacionario de migración de iones cloruro, el porcentaje máximo de remplazo optimo es de 30%, el incremento entre el concreto elaborado con NFA y los concretos con remplazos del RFA de 30%, es de 3.2%; los concretos con remplazos de 50% de RFA alcanzaron un porcentaje 14.2 %. De acuerdo a la figura 9, el incremento de la absorción aumentó con los más altos porcentajes de remplazo de RFA, la sorptividad también se puede disminuir con el uso adiciones minerales.¹⁸

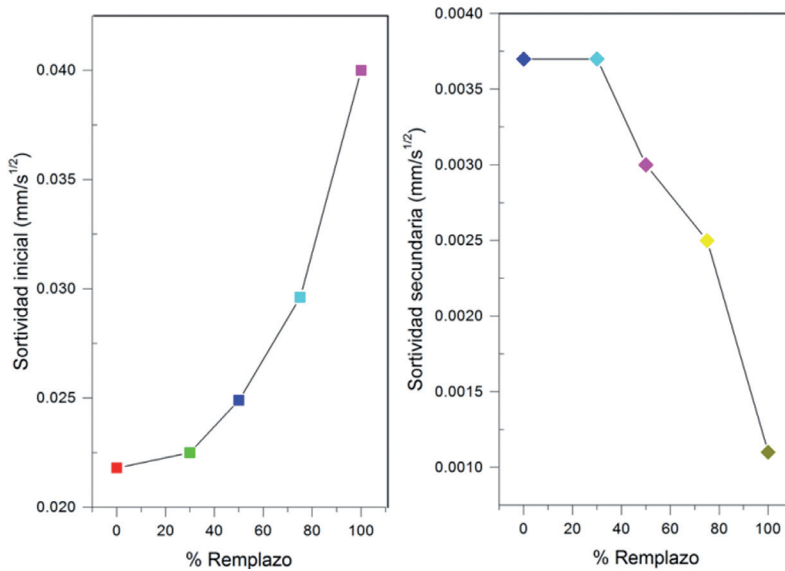


Fig. 9. Resultados para sorptividad en concretos con diferentes cantidades de remplazos.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se presentan las siguientes conclusiones. El reemplazo del agregado natural por arena reciclada en altos porcentajes (75 y 100%), haciendo uso de la metodología de las tres zonas, produjo mejoras en las propiedades mecánicas del concreto respecto a lo reportado en la comunidad científica. El uso de la forma de reemplazo reduce en solo el 6.1 % la resistencia a la compresión del concreto cuando se reemplaza el 30% de agregado natural. Lo que puede redundar en una opción clara para producir concretos sin mayores impactos en las propiedades mecánicas. (las reducciones de resistencia respecto al patrón con un 30% de reemplazo, son del orden de 7.4% para la tracción indirecta y del 8.2 % para la flexión).

Altos porcentajes de reemplazo de agregado fino natural afectan la durabilidad del concreto con agregado reciclado, más sin embargo estas deficiencias podrían superarse con la inclusión de materiales cementicios suplementarios.

La producción de concreto utilizando la metodologías de las tres zonas para hacer uso de los residuos de construcción podría contribuir en la reducción en el impacto ambiental que produce la acumulación de escombros, así como, también la reducción de costos, pues el agregado fino reciclado es más económico que el agregado natural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Transferencia y al programa de Ingeniería Civil de la Universidad de la Salle, sede Bogotá, por el soporte provisto para el desarrollo de esta investigación, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL.

REFERENCIAS

1. Fisher, C.; Werge, M. EU as a Recycling Society; ETC/SCP Working Paper 2/2009; Available online: <http://scp.eionet.europa.eu.int> (accessed on 14 August 2009).
2. Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate—FHWA State of the Practice National Review 2004; U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 2004; pp. 1-47.
3. INE, Semarnat. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos. México. 2012.
4. Castaño, J.O, Misle Rodriguez, R., Lasso, L.A., Gomez Cabrera, A., Ocampo, M.S., Waste management from construction and demolition (RCD) in Bogotá: Prospects and limitations. *Tecnura*, 17 (38) 121-129 2013.
5. T. Ozbakkaloglu, A. Gholampour, and T. Xie, “Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 2, p. 4017275, 2018.
6. S. Yehia, K. Helal, A. Abusharkh, A. Zaher, and H. Istaitiyeh, “Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 9, no. 2, pp. 219–239, 2015.
7. M. Malešev, V. Radonjanin, and S. Marinković, “Recycled concrete as aggregate for structural concrete production,” *Sustainability*, vol. 2, no. 5, pp. 1204–1225, 2010.
8. C. Neno, J. de Brito, and R. Veiga, “Using fine recycled concrete aggregate for mortar production,” *Mater. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–177, 2014.
9. V. W. Y. Tam, C. M. Tam, and Y. Wang, “Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 10, pp. 1928–1939, 2007.
10. V. W. Y. Tam, X. F. Gao, and C. M. Tam, “Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 6, pp. 1195–1203, 2005.
11. Nordic Council of Ministers, Chloride migration coefficient from non steady state migration experiments. 1999, pp. 1–8.
12. NORDTEST. NT BUILD 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland: Nordtest; 1999. p. 1–8.
13. M. M. Reda Taha, A. S. El-Dieb and N. G. Shrive, Sorptivity: a reliable measurement for surface absorption of masonry brick units, *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 34, August-September 2001, pp 438-445.
14. ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
15. ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

16. ASTM C78 / C78M-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
17. Lucio G.L.Y. Roa M. A. and Rodriguez D. effect of two mixing methodologies on the mechanical properties of recycled structural concrete with a water-cement ratio of 0.48, Thesis, La Salle University, Bogotá, 2016.
18. M. Gesoglu *et al*, Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1847–1854.

