

## Agregados finos de concreto reciclado y su influencia en concreto no estructural Recycled concrete fine aggregates and their influence on non-structural concrete

M. Bucio-Toledo <sup>a,\*</sup>, A. Flores-Sandoval <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Campo de Tecnologías, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.*

### Resumen

La influencia de los agregados reciclados obtenidos de los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) tiene un interés creciente en México debido a los altos volúmenes que se producen diariamente. Además, las actualizaciones en la normatividad sobre el manejo integral de los residuos incentivan al desarrollo de nuevos productos que cumplan con las especificaciones técnicas para su aplicación. Por estas razones, en este documento se lleva a cabo un análisis cuantitativo del efecto de los agregados finos reciclados en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto no estructural, argumentando las características físicas en diferentes diseños de mezcla con una variación de material reciclado del 50% al 100%. Con el fin de generar alternativas para el aprovechamiento de los RCD se ha diseñado un prototipo de adoquín para su disposición en pavimentos Tipo A comprobando su factibilidad por medio de la caracterización de sus propiedades.

**Palabras Clave:** Agregados, Concreto, Concreto Reciclado, Propiedades Mecánicas, RCD, Pavimentos.

### Abstract

The influence of recycled aggregates obtained from construction and demolition waste (CDW) has a growing interest in Mexico due to the high volumes that occur daily. In addition, updates in the regulations on the integral management of waste encourage the development of new products that meet the technical specifications for their application. For these reasons, in this document a quantitative analysis of the effect of fine aggregates recycled on the mechanical properties of non-structural concrete mixtures is carried out, arguing the physical characteristics in different mixing designs with a variation of 50% recycled material to 100%. In order to generate alternatives for the use of CDW, a paver blocks prototype has been designed for its placement in Type A pavements, verifying its feasibility through the characterization of its properties.

**Keywords:** Aggregates, Concrete, Recycled Concrete, Mechanical Properties, CDW, Pavements.

### 1. Introducción

El mundo cada vez está más urbanizado. Desde 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60% para 2030. Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros de crecimiento económico, ya que contribuyen al 60% aproximadamente del PIB mundial, sin embargo, también representan alrededor del 70% de las emisiones de carbono mundiales y más del 60% del uso de recursos (ONU, 2022).

Debido a la creciente necesidad de urbanización, se espera que el uso de concreto se duplique para 2050 y dado que los agregados comprenden alrededor del 70% del volumen del concreto, se esperan tasas alarmantes de agotamiento de los recursos naturales no renovables (Hafez et al., 2020).

En la Ciudad de México el problema de residuos de construcción y demolición (RCD) es incalculable, se estima un aumento de más de 300% en la última década, según datos de la SEDEMA, para el 2019 se tenía un promedio diario de producción de RCD alrededor de las 14 mil toneladas y para el año en 2021 un aproximado de más de 16 mil toneladas (SEDEMA, 2022).

El uso de los agregados de concreto reciclado a nivel internacional es un área con bastantes avances tecnológicos y normativos, llegando hasta en un 90% de aprovechamiento y reintegración de los materiales en algunos países europeos (CMIC, 2014b), en contraste, en México existe un rezago en el tema de economía circular (EC). Actualmente se cuentan con 2 plantas privadas procesadoras de residuos trabajando en la CDMX y un promedio de menos del 3% de aprovechamiento de productos reciclados (CMIC, 2014a), ver Figura 1.

\*Autor para la correspondencia: mabel@comunidad.unam.mx

**Correo electrónico:** mabel@comunidad.unam.mx (Rosario Mabel Bucio Toledo), ana\_floressandoval@hotmail.com (Dolores Ana Flores Sandoval)



Figura 1: Plantas de tratamiento de RCD en la CDMX. Concretos Recicladados S.A. de C.V. (<http://www.concretosrecicladados.com.mx>). Y Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V. (<https://csmx.mx/>).

El objetivo particular es analizar la influencia de la arena reciclada durante el proceso de elaboración del concreto, evaluar el comportamiento mecánico en los resultados en la resistencia máxima a la compresión y poder determinar las adecuaciones necesarias en un diseño de mezcla para la elaboración de adoquines.

## 2. Método y Materiales

El método que se empleó para el estudio es de tipo experimental, mediante un proceso cuantitativo (Sampieri et al., 2014). Se siguieron procesos establecidos en normas nacionales e internacionales vigentes (ONNCCE, 2022).

Se siguieron procesos de muestreo de diferentes diseños de mezcla y del registro de su resistencia a las fuerzas de compresión en diferentes tiempos de fraguado (7, 14 y 28 días). Para esta investigación es primordial conocer los efectos en la sustitución de los materiales naturales por reciclados al incrementar su porcentaje, conocer cómo se comportan en el proceso de elaboración de la mezcla y los resultados obtenidos en el concreto endurecido.

El proceso para el diseño de una mezcla ideal con agregados reciclados, consta como primer paso, conocer la materia prima y sus propiedades, para después hacer la sustitución parcial de los agregados finos naturales (arena) por agregados reciclados finos de concreto (50%, 60%, 70% 80%, 90% y 100% de sustitución). Además de una comparativa de sus propiedades por caracterización mecánica, tomando como medida de control una mezcla elaborada de forma convencional (testigo), ver Tabla 1. El objeto final a obtener es un prototipo de pavimento (adoquín), con propiedades requeridas por la norma referente a pavimentos tipo A.

El proceso llevado a cabo se dividió en 5 fases: Iniciando con la caracterización de los agregados reciclados, la segunda fase es el diseño de las mezclas, la tercera fase es la elaboración, curado y control de las probetas. Para el muestreo, se realizaron pruebas mecánicas de resistencia a la compresión para definir las proporciones en el que las propiedades del material no se vean comprometidas. En una cuarta fase se optimizan los procesos y se indagan los resultados en la búsqueda de la mezcla ideal para el diseño del prototipo y llevar a cabo los ensayos requeridos por la normatividad vigente. Y en una quinta fase el análisis de los datos generados, (Sampieri et al., 2014).

### 2.1. Materiales

Los materiales empleados para la elaboración de adoquines convencionalmente son de origen pétreo, además de que por sus características técnicas y económicas resulta factible para

Mezcla	Dosificación variable				
	Arena natural	Arena reciclada	Agua	Gravilla	Cemento
Mezcla de control (Testigo)	100%	-			
Mezcla con diferente % de sustitución	50-0%	50-100%	% Variable		Materiales de control
Mezcla optimizada (Prototipo)	-	100%			

Tabla 1: Muestra general de las mezclas

La Secretaría de Obras y Servicios (PAOT, 2022) han llegado a contabilizar hasta 984 tiraderos clandestinos, acarreamo con esto graves problemas medio ambientales, de imagen urbana y de salud pública (Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México, 2019, p. 204).

Los controles para el manejo del RCD se han visto deficientes, por ello, la actualización en los instrumentos regulatorios (Streaming IINGEN, 2021) cuyo fin es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos, que permitan a los establecimientos y grandes generadores de residuos, incorporar acciones que disminuyan los impactos negativos (NACDMX-007-RNAT-2019, 2021).

Independientemente de los numerosos estudios encontrados, no se encontró un consenso sobre la proporción de reemplazo de agregados finos naturales por agregados finos reciclados de RCD que lograría el potencial de sostenibilidad óptimo de la mezcla de concreto resultante (Kisku et al., 2017).

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos al relacionar el porcentaje de sustitución de agregados finos naturales por reciclados en la elaboración de concreto no estructural para su disposición en pavimentos Tipo A (NMX-C-314-ONNCCE-2014).

la construcción (Montiel Miguel y Cottier Caviedes, 2017). Su fabricación es relativamente sencilla y es posible llevar un control de calidad en la elaboración de cada pieza. Existen características que deben cumplir por normatividad los materiales para la conformación del producto, a continuación, se hace un repaso de cada material utilizado:

- **Agregados finos naturales (arena):** Es el material que pasa a partir del tamiz #4 hasta el tamiz #100. Los agregados finos para la fabricación de adoquines deben cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE-2014). Esta arena se emplea como material de control y referencia para la comparación de sus propiedades físicas. Se empleará arena gris por ser un material altamente comercial y de fácil disposición en la zona centro del país, ver Figura 2.



Figura 2: Agregados finos: Arena natural.

- **Agregados reciclados:** Es la arena obtenida del procesamiento del concreto reciclado. Este material debe pasar a partir del tamiz #4 hasta el tamiz #100. Se hicieron pruebas de tamizado para determinar la granulometría y módulo de finura del agregado fino reciclado. Entendamos por granulometría, la distribución de los tamaños de las partículas del agregado, una buena combinación en el tamaño de los agregados resulta en una mejor distribución de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de compresión (M. Neville, 2013, p.113-115). Este material es obtenido de la Planta de Tratamiento Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V., ubicada en avenida 5 de mayo #150, en las inmediaciones de la alcaldía Miguel Hidalgo, CDMX (<http://csmx.mx/>, 2022), ver Figura 3.



Figura 3: Agregados finos: Arena de concreto reciclado.

- **Agregados gruesos:** Es el material cuyas partículas quedan retenidas en el tamiz #4, es decir no mayor a 9.50 mm ni menor a 4.75 mm. Los agregados gruesos para la fabricación de adoquines deben cumplir los

requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE. Convencionalmente se usa para el diseño de la mezcla granzón, así que en específico se emplearon agregados con un tamaño máximo nominal de 9.5 mm (3/8”).

- **Cemento:** Cemento Portland Ordinario Tipo 1 (también denominado como Cemento Tipo 1-RTCR). El cemento empleado para la fabricación de adoquines debe cumplir los requisitos establecidos en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE. Según datos del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC, 2022a) el Cemento Portland Ordinario es excelente para construcciones en general, zapatas, columnas, trabes, castillos, dalas, muros, losas, pisos, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales, etc. Ideal para la elaboración de productos prefabricados (Tabicones, adoquines, bloques, postes de luz, lavaderos, balaustradas, etc.).
- **Agua:** Agua embotellada, esto con el fin de descartar cualquier impacto provocado por un exceso de impurezas en el agua. De esta manera se garantizan las condiciones del agua durante el proceso de experimentación y considerando la duración de la investigación.
- **Aditivos:** Si bien algunas investigaciones consultadas hacen el uso de aditivos en el diseño de la mezcla, para esta investigación no se planteó, con el fin de mantener los objetivos de esta investigación y observar los impactos de los agregados reciclados sin intervención de agentes adicionales (IMCYC, 2006).

### 3. Normatividad

Se reunieron las consideraciones necesarias para validar el proceso. Para las pruebas mecánicas se usaron criterios establecidos por la normatividad mexicana, emitidos por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE, 2022).

Para los ensayos de caracterización granulométrica de los agregados finos (arenas), se tomó como referencia la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción - Agregados para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo”. Esto para determinar la proporción de las partículas finas, medias y gruesas en las arenas, determinar su módulo de finura y finalmente determinar la calidad de las arenas.

Y para los ensayos de caracterización de las mezclas, se consultó la norma mexicana NMX-C-314-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción – Mampostería- Adoquines para uso en Pavimentos – Especificaciones y Métodos de Ensayo”. Las especificaciones de los adoquines según la norma, para la investigación son referentes de lo que mínimamente se debe alcanzar en la elaboración de la mezcla. Según la norma mexicana, las pruebas que debe satisfacer un pavimento (adoquín) son: resistencia a la compresión, resistencia a la abrasión y porcentaje de absorción de agua.

### 3.1. Probetas

Para determinar el número y las dimensiones de las probetas se empleó la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013, complementando con la norma internacional ASTM C109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars - Cube Specimens (ASTM, 2022)

Se diseñaron moldes de madera para obtener probetas con dimensiones de 10 cm por lado para la etapa de muestreo, esta es una opción conveniente por su fácil manejo, desmolde y obtener lados lisos, además de que es un material que no reacciona con las mezclas. Se elaboraron probetas para obtener concreto con diferentes días de maduración (7, 14 y 28 días).

Para las pruebas de laboratorio del prototipo se diseñó el molde para la obtención de un adoquín de 20 cm de largo por 20 cm de ancho y 6 cm de altura (conforme a la norma) para las pruebas de resistencia a la abrasión y para obtener el porcentaje de absorción de agua, para las pruebas de resistencia a la compresión se elaboran moldes cúbicos correspondiendo a la altura del prototipo: 6 x 6 x 6 cm por lado.

### 4. Determinación granulométrica de las arenas

En la práctica, no se realizan pruebas regulares para conocer las características granulométricas de las arenas, en especial de las arenas recicladas ya que no se tiene un control de calidad específico, por lo cual se desconocen las características que estas presentan.

Para obtener la curva granulométrica de las arenas se realizaron pruebas de tamizado, ver Figura 4, los resultados de las pruebas nos permiten obtener los porcentajes de máximos y mínimos del tamaño del grano. Con estos registros es posible determinar si las arenas analizadas se encuentran dentro de los parámetros recomendados (M. Neville, 2013).

La curva granulométrica de la arena natural, ver Figura 6, cumple con la cantidad de partículas retenidas en los tamices #4, #8, #16 y #30, se observa que excede de los límites máximos de los tamices #50 y #100. Es decir que cuenta con un mayor porcentaje de finos, pero una adecuada cantidad de gruesos y medios. Su módulo de finura es de 3.43 (fuera de los parámetros MF 2.3 – 3.1).



Figura 4: Elaboración de pruebas de tamizado para determinar la granulometría de las arenas. Instalaciones y equipo del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM.

La curva granulométrica de la arena de concreto reciclado, ver Figura 6, cumple con la cantidad de partículas retenidas en los tamices #8, #16 y #30, se observa que excede de los límites máximos de los tamices #50 y #100 y por debajo del rango mínimo en el tamiz #4. Es decir que cuenta con un mayor porcentaje de finos y no cuenta con la cantidad mínima de gruesos, pero una tiene una adecuada cantidad de medios. Su módulo de finura es de 3.34 (fuera de los parámetros MF 2.3 – 3.1) (NMX-C-111-ONNCCE-2014).

### 5. Muestreo

Las investigaciones sobre agregados finos de concreto reciclado tienen suficientes datos teóricos para elaborar un diseño de mezcla inicial y analizar los resultados. Para tomar una dirección diferente, analizamos los impactos en diferentes porcentajes de sustitución y hacer recomendaciones, en donde los procesos no se vean afectados por el uso de reciclados. Así, con los datos obtenidos acercarnos a una optimización de mezcla de concreto para la fabricación de un prototipo de adoquín.

Retomamos datos sobre el uso de agregados reciclados y sus resultados en la elaboración de concreto para definir una mezcla inicial con una resistencia a la compresión de 250kg/cm<sup>2</sup> (Montiel Miguel y Cottier Caviedes, 2017, p. 41), definiendo diferentes diseños de mezclas con una variación en el porcentaje de sustitución de agregados. El método de dosificación empleado por Montiel y Cottier para el diseño de mezcla es el ACI (American Concrete Institute), con la aclaración que hace “los agregados reciclados resultan ser muy absorbentes y por esta razón se debe tener mucho cuidado al realizar el cálculo de corrección de agua por absorción” (2017, p. 40).

En este paso no hicimos ajustes por absorción de agua de los agregados, para observar el comportamiento en el proceso de mezclado variando solamente los porcentajes de agregados naturales y reciclados, dejando el resto de los componentes como materiales constantes. Analizamos el acabado y la apariencia del material, así como los resultados de las pruebas de caracterización mecánica por el ensayo de compresión para determinar el impacto de los agregados reciclados al incrementar el porcentaje de sustitución, ver Figura 5.



Figura 5: Fabricación de probetas con diferentes diseños de mezcla. Concreto endurecido.

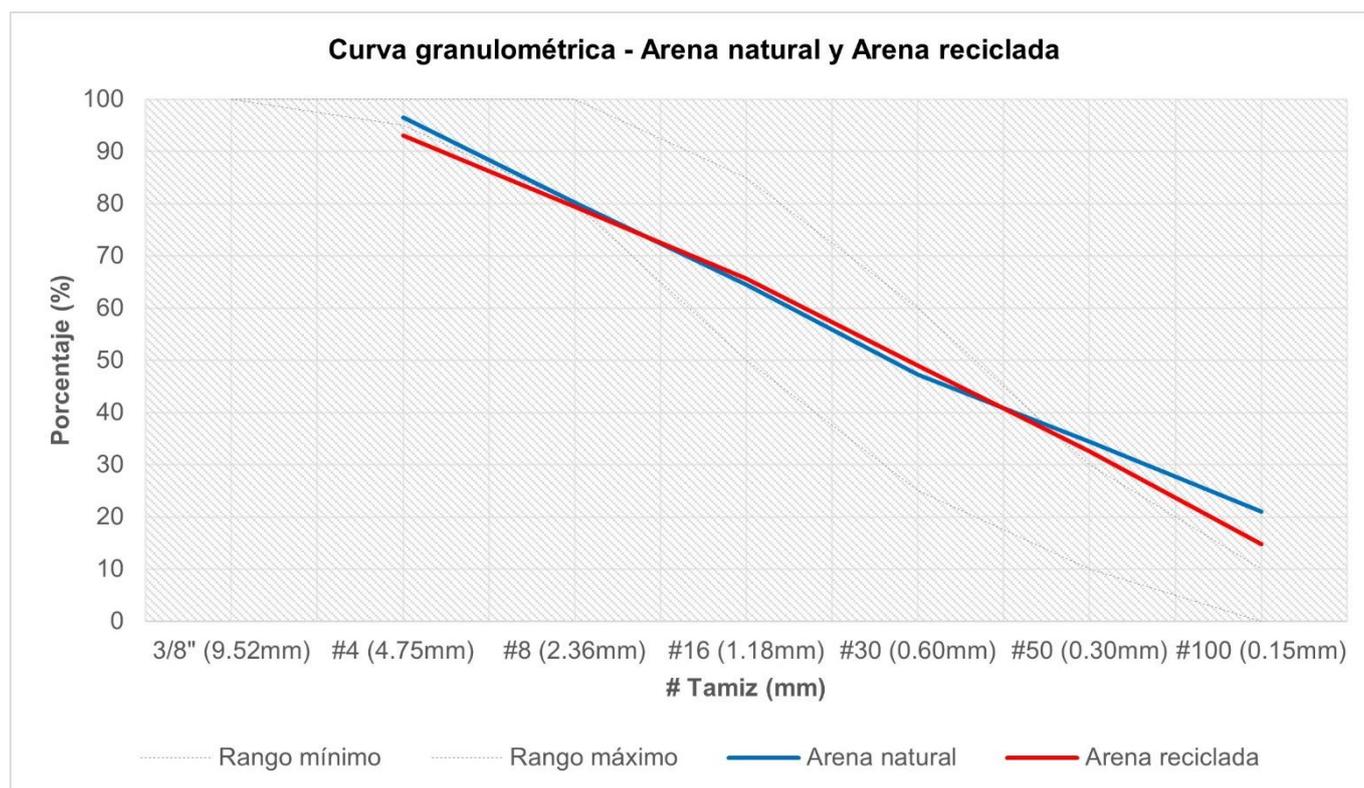


Figura 6: Comparación de la curva granulométrica de arena natural y la arena reciclada

### 5.1. Diseño de mezcla inicial

El muestreo se abordó en dos etapas (Lotes). El Lote 1 se elaboró con una mezcla de control y mezclas con diferentes porcentajes de agregados finos reciclados (50, 60, 70, 80, 90 y 100%) y un tiempo de fraguado de 28 días para llevar a cabo las pruebas de resistencia a compresión.

Se hizo una evaluación en concreto fresco:

- Absorción de agua de los agregados,
- Nivel de trabajabilidad,
- La cohesión,
- Moldeado,
- Merma.

Y la evaluación en concreto endurecido:

- Resistencia a la compresión promedio (5 probetas por mezcla con 28 de fraguado)
- Densidad promedio (5 probetas por mezcla con 28 de fraguado)
- Porosidad
- Segregación del material
- Apariencia del acabado

Durante esta etapa observamos un incremento en el esfuerzo resistente a la compresión al incrementar el porcentaje de agregados reciclados hasta el 70%, a partir del 80% de sustitución de agregados reciclados se requiere ajustes en el diseño de la mezcla por absorción de agua y evitar repercutir negativamente en el esfuerzo a compresión.

También debemos considerar que a partir de la sustitución del 80% o más, la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco se dificulta y en estado endurecido la apariencia del producto terminado presenta porosidad, segregación y acabado irregular. Ver Tabla 2.

### 5.2. Segunda etapa de evaluación

En las pruebas de laboratorio se han llevado a cabo los ensayos de resistencia a la compresión, para la segunda etapa de evaluación se ha fabricado un Lote 2, con las mezclas que tuvieron resultados relevantes en el Lote 1. Para los ensayos a la compresión, se tomó como referencia la Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013, ver Figura 7.

Para esta etapa se llevó el control de tres mezclas en tiempos de fraguado de 7, 14 y 28 días.

- Una mezcla con 100% de agregados finos reciclados.
- Una mezcla 70/30 determinada por el estado del arte y de los resultados positivos obtenidos en el Lote 1,
- Una mezcla de control con agregados finos naturales.



Figura 7: Elaboración de pruebas de resistencia máxima a la compresión. Instalaciones y equipo del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM.

Tabla 2: Evaluación del comportamiento de las mezclas en estado fresco y en concreto endurecido

Evaluación de concreto en estado fresco						
Pavimento Tipo A	Proporción	Absorción de agua	Nivel de trabajabilidad	Cohesión	Moldeado	Merma
Control	100% arena natural	Bajo	Bueno	Bueno	Bueno	Sin merma
50%	50% / 50%	Bajo	Bueno	Bueno	Bueno	Bajo %
60%	60% / 50%	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Bajo %
70%	70% / 50%	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo %
80%	80% / 50%	Alto	Malo	Malo	Malo	Medio %
90%	90% / 50%	Alto	Malo	Malo	Malo	Medio %
100%	100% arena reciclada	Muy alto	Muy malo	Muy malo	Muy malo	Alto %

Evaluación de concreto endurecido (28 días maduración)						
Pavimento Tipo A	Proporción	f'c Promedio MPa/cm <sup>2</sup>	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Porosidad	Segregación	Acabado
Control	100% arena natural	13.89	1781.60	Baja	Bajo	Bueno
50%	50% / 50%	11.80	1666.18	Baja	Bajo	Bueno
60%	60% / 50%	11.89	1660.24	Baja	Bajo	Bueno
70%	70% / 50%	12.80	1675.97	Media	Bajo	Bueno
80%	80% / 50%	12.11	1676.59	Media	Medio	Malo
90%	90% / 50%	11.81	1648.22	Alta	Medio	Malo
100%	100% arena reciclada	11.53	1640.79	Alta	Alto	Muy malo

Los resultados a 28 días de las tres mezclas se encuentran por encima de los 14 MPa/cm<sup>2</sup> promedio muestral de resistencia máx. a la compresión, siendo la mezcla 70/30 con los mejores resultados. En la mezcla de control y en la mezcla con 100% de agregados finos reciclados obtuvimos una diferencia mínima en los resultados. Podríamos indagar por el estado del arte (M. Neville, 2013, pp. 89-92), en los impactos que tiene la pérdida de humedad, la capacidad de absorción de los agregados por el mortero adherido y que dentro del material reciclado existe cierta cantidad no controlada de cemento hidratado y no hidratado (Martín-Morales, 2013, pp. 69-70), ver Figura 8.

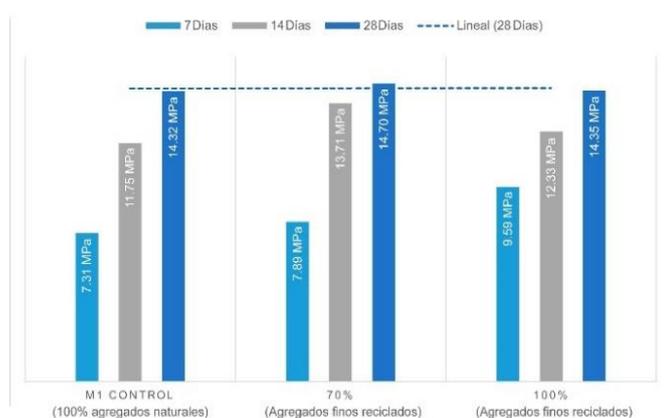


Figura 8: Resultados de resistencia a la compresión de probetas con control de fraguado a 7,14 y 28 días de maduración.

Los agregados finos empleados tienen diferentes propiedades, que al conocerlas y contemplarlas en el diseño de mezcla se obtuvieron resultados homogéneos en las pruebas de laboratorio.

Al hacer un ajuste en por absorción de agua de los agregados reciclados obtuvimos una mejor cohesión de los ingredientes en el proceso de mezclado, una mejor resistencia, y un buen acabado en el concreto endurecido.

Para esta etapa se concluye que son necesarios ajustes de la mezcla por los efectos que tiene la granulometría de la arena reciclada y el exceso de finos, ya que la mala distribución de las partículas de la arena puede afectar las propiedades mecánicas del material (M. Neville, 2013, p 74). Para alcanzar lo requerido por normatividad y cumplir con los objetivos fue necesario un nuevo diseño de mezcla.

## 6. Análisis de los resultados de la etapa de muestreo

Se hizo un muestreo con diferentes porcentajes de agregados finos reciclados para conocer el impacto dentro de la mezcla, se controlaron las proporciones de cada material y se observó que a partir del 80% de sustitución de agregados finos naturales por reciclados es necesario el ajuste de agua por absorción de humedad de los reciclados por sus condiciones de porosidad. De no ser así, a partir de este porcentaje no tenemos trabajabilidad en el proceso de mezclado.

El Impacto en las mezclas de iguales proporciones y en exactas condiciones de elaboración, oscilan en rangos generales de 1 a 2 MPa/cm<sup>2</sup> de resistencia a la compresión.

En un porcentaje de sustitución de 70% agregados finos reciclados y 30% de agregados naturales observamos que no se necesita ajuste de agua por absorción de humedad. Los datos obtenidos a los 7 días en comparación con nuestra mezcla de control son similares al promedio muestral, con una diferencia de 0.5 MPa, el siguiente dato significativo fue la madurez de la mezcla al obtener un aumento del 75% en la resistencia del material.

En la primera etapa la mezcla con sustitución al 100% de los agregados finos naturales por reciclados en comparación con la mezcla de control, obtuvimos una reducción significativa en la resistencia muestral de 2.36 MPa a los 28 días. Con observaciones en la técnica de elaboración (estado húmedo), no obtuvimos trabajabilidad lo que impacto en la apariencia y el acabado. Y en las probetas (estado seco) tuvimos desprendimientos del material. Por lo cual se procedió a hacer un ajuste por absorción de humedad. Haciendo ajuste para el segundo lote en una comparativa con nuestra mezcla de control, obtuvimos un incremento en la resistencia muestral de 2.28 MPa a los 7 días y un promedio muestral de 14.35 MPa a los 28 días, tenemos una ganancia en la resistencia en comparación con el L1. La madurez en la resistencia de la segunda medición respecto a la primera es del 25%. Las observaciones en la técnica de elaboración en estado húmedo obtuvimos buena trabajabilidad lo que impacto en la apariencia y en el buen acabado.

La observación a partir del muestreo es que para elaborar una mezcla con 100% de agregados reciclados es necesario un ajuste de agua por absorción de humedad de los agregados finos. A partir de la experiencia del muestreo se obtuvo buena trabajabilidad, buena apariencia y buen acabado. Si comparamos los promedios muestrales obtenidos de esta mezcla con nuestra muestra de control, tenemos una diferencia de 0.03 MPa superior a la de control.

## 7. Optimización del diseño de mezcla para uso en pavimentos

Con la experiencia recabada, se hizo un diseño de mezcla optimizado para cubrir las características mínimas establecidas por la norma (NMX-C-314-ONNCCE-2014) de uso peatonal ver Figura 9.



Figura 9: Imagen prototipo de adoquín de concreto reciclado

Los umbrales del producto esperado de acuerdo a los establecidos por norma son:

Propiedades para pavimento Tipo A de uso peatonal:

- 60 mm espesor mínimo nominal
- 250 kg/cm<sup>2</sup> de esfuerzo resistente máximo a la compresión
- 11% de absorción de agua máxima individual
- La reducción del espesor no debe ser mayor que 3 mm en la prueba de resistencia a la abrasión.

El procedimiento para lograr el diseño de mezcla es mediante el método de dosificación ACI (American Concrete Institute).

Se hizo el ajuste del agua debido a la absorción y humedad de los agregados reciclados. Se considero la humedad de los agregados para realizar una dosificación real durante la elaboración de la mezcla ya que el agua de absorción no forma parte del agua de mezclado, por lo tanto, debe quedar excluida en el ajuste del agua adicional ver Tabla 3.

Tabla 3: Diseño de mezcla de concreto para un f'c de 250 kg/cm<sup>2</sup> con ajuste de agua. Cantidades teóricas para un volumen 1m<sup>3</sup>.

Material	Cantidad
Cemento	431.25 kg
Agua	307.64 L
Grava	648.44 kg
Arena Reciclada	723.41 kg
Total	2110.74 kg

### 7.1. Resultados de resistencia esfuerzo a la compresión

Para los ensayos a la compresión, se tomó como referencia la Norma Mexicana (NMX-C-036-ONNCCE-2013). Los ensayos a compresión fueron elaborados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE), ver Figura 10.

Se elaboró una mezcla con 100% de agregados finos reciclados y corrección por absorción de agua de la arena de 12% y se previno la pérdida de resistencia a causa de la granulometría de la arena reciclada y el exceso de partículas finas.

Se fabricaron probetas cúbicas 6 x 6 x 6 cm (determinado por el espesor del prototipo). Se hizo el ensayo de 5 probetas a los 28 días de fraguado.

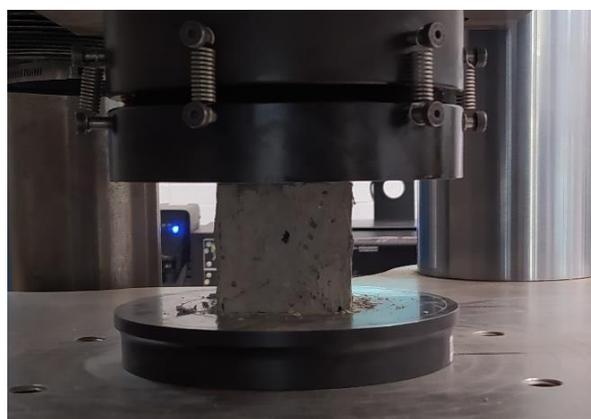


Figura 10: Pruebas mecánicas del prototipo. Instalaciones y equipo del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM.

Observamos que el ajuste por absorción de humedad de los RCD impacto en la elaboración de forma positiva, logrando un buen trabajo de moldeado, la buena cohesión de los materiales y endurecido el concreto se logró un buen acabado. No hubo merma en el proceso, ver Tabla 4.

Se obtuvo la resistencia requerida por la norma para pavimentos Tipo A para uso en adoquines con una desviación estándar de 0.09 MPa, ver Tabla 5.

Tabla 4: Evaluación del comportamiento de las mezclas en estado fresco

Pavimento Tipo A	
Prototipo 100% Arena reciclada	
Absorción de agua	Bajo
Nivel de trabajabilidad	Bueno
Cohesión	Bueno
Moldeado	Bueno
Merma	Sin merma

Tabla 5: Evaluación del comportamiento de las mezclas en concreto endurecido

Pavimento Tipo A	
Prototipo 100% Arena reciclada	
f'c Promedio MPa/cm <sup>2</sup>	25.88 (s 0.09)
Densidad kg/m <sup>3</sup>	1797.77
Porosidad	Baja
Segregación	Bajo
Acabado	Bueno

### 7.2. Resultados de resistencia esfuerzo a la abrasión

Para determinar la resistencia a la abrasión, se tomó como referencia la Norma Mexicana (NMX-C-314-ONNCCE-2014.). Los ensayos de resistencia a la abrasión fueron elaborados en las instalaciones del Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC, 2022b), ver Figura 11.



Figura 11: Pruebas de abrasión en adoquines.

Se fabricaron probetas 20 x 20 x 6 cm (Tamaño del prototipo) y se llevó a cabo el ensayo en 2 probetas.

Datos obtenidos del ensayo:

Tabla 6: Datos sobre la prueba de abrasión en laboratorio. Datos obtenidos por el Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).

Especimen	Cantidad de plastilina para relleno de huecos (g)			Volumen de la plastilina cm <sup>3</sup>	Reducción de espesor (mm)		Coeficiente de pérdida volumétrica por abrasión	
	Inicial	Final	Diferencia (Wa)		Total	Promedio	Total	Promedio
1	91.4	89.9	1.5	0.85	3.28	0.82	0.03	-
2	89.9	88.1	1.8	1.02	3.35	0.84	0.04	0.04

- Tiempo de aplicación del chorro de arena por prueba: 1 minuto
- Peso específico de la plastilina: 1.76
- Área sometida a 1 disparo: 6.45 cm<sup>2</sup>
- Área sometida a los 8 disparos: 51.6 cm<sup>2</sup>
- Presión de aire con que se realizan los disparos de arena: 410 kPa ± 1 kPa
- Flujo de arena: 600 g/min ± 25 g/min
- Especificación de pérdida de volumen máxima: 15 cm<sup>3</sup> / 50 cm<sup>2</sup>
- Especificación de reducción de espesor máximo: 3 mm

Se obtuvo la resistencia a la abrasión dentro de lo especificado por la norma para pavimentos Tipo A para uso en adoquines, ver Tabla 6.

### 7.3. Resultados de absorción de agua

Para determinar la absorción de agua, se tomó como referencia la Norma Mexicana (NMX-C-037-ONNCCE-2013), ver Figura 12.

Se fabricaron probetas de 20 x 20 x 6 cm (Tamaño del prototipo). Se hizo el ensayo de 5 probetas.

#### Datos generados

- Ms Masa seca del espécimen (g)
- Ma Masa del espécimen sumergido en agua (g)
- M1 Masa húmeda (g) absorción inicial
- Cb Coeficiente de absorción inicial g/cm<sup>2</sup> x min<sup>0.5</sup>)
- Msss Masa saturada y superficialmente seca (g)
- A1 Volumen de agua absorbido referido al volumen aparente del espécimen en dm<sup>3</sup>/m
- A Es la absorción en % (en masa)



Figura 12: Prueba para determinar el porcentaje de absorción de agua.

El porcentaje de 6.49 que se obtuvo de absorción de agua máxima se encuentra dentro de lo especificado por la norma para pavimentos Tipo A para uso en adoquines, ver Tabla 7.

Tabla 7: Datos sobre la prueba de absorción de agua

Datos	Espécimen				
	1	2	3	4	5
Volumen m <sup>3</sup>	2349.633	2384.027	2369.365	2348.213	2352.133
Ms (g)	4215	4392	4141	4122	4240
Ms Prom (g)	4222.00				
Ma (g)	4520	4654	4404	4433	4468
Densidad kg/m <sup>3</sup>	1793.897	1842.261	1747.726	1755.377	1802.619
Den Prom kg/m <sup>3</sup>	1788.38				
M1 (g)	4228.000	4417.000	4155.000	4136.000	4254.000
M1 Prom (g)	4238.00				
Cb (g/cm <sup>2</sup> xmin <sup>0.5</sup> )	1.04	1.99	1.11	1.11	1.11
Cb Prom	1.27				
Msss (g)	4520.00	4654.00	4404.00	4433.00	4468.00
A (%)	7.2	6.0	6.4	7.5	5.4
A Prom (%)	6.49				

## 8. Conclusiones

Esta investigación describe el proceso de elaboración y maduración del concreto en mezclas con diferentes porcentajes de agregado finos reciclados de concreto, como resultado obtenemos las siguientes conclusiones:

- Tanto los agregados reciclados como los naturales cuentan con partículas fuera de los rangos establecidos por la normatividad, con mayor porcentaje de finos en los dos tipos de arenas. El módulo de finura (MF) de ambas arenas se encuentran fuera de los parámetros.
- Al no cortar con un estándar de calidad de los agregados reciclados por su procedencia, es necesario trabajar con datos en rangos no específicos (Centeno et al., 2014).
- Se ha verificado el impacto de los agregados reciclados en los resultados del esfuerzo máximo a la compresión, observando que los agregados finos reciclados tienen un comportamiento similar al de las arenas naturales dentro de una mezcla de concreto cuando se sustituye hasta un 70%.
- Los diferentes muestreos demostraron que a partir del 80% de sustitución de agregados finos naturales por reciclados es necesario un ajuste de agua por absorción de humedad.
- En una sustitución al 100% de los agregados finos naturales por reciclados, se obtuvo un comportamiento similar en el esfuerzo a compresión, pero repercutiendo en la trabajabilidad, apariencia y acabado de la mezcla.

- Es necesario conocer el comportamiento del prototipo por tiempos prolongados, su interacción con el medio ambiente, con otros materiales y dentro de un sistema (Armenta et al., 2018).
- Es necesario seguir generando investigación con diferentes aplicaciones de los agregados reciclados para diferentes fines dentro de la arquitectura, conocer su comportamiento reducirá la incertidumbre hacia estos materiales (Karthik y Maruthachalam, 2021).
- Es necesario evaluar económicamente las ventajas al utilizar un diseño de mezcla con materiales reciclados, que corresponda a los elementos constructivos en los que se aplica (Vieira et al., 2016)
- Se recomienda un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) específico para especificar las ventajas y desventajas de su uso, su impacto ambiental y posibles mejoras para su reintegración a un ciclo cerrado (Ortiz et al., 2009)

Partiendo de la limitada experiencia con que México cuenta para el manejo de los RCD tanto en su normatividad como en su aplicación en campo es que convendría un estudio comparativo del manejo de los RCD y aplicaciones de las normas internacionales, implementar procesos para una adecuada gestión de los recursos con lo que se pretende obtener mejoras tanto en el proceso de tratamiento de residuos como la obtención de agregados reciclados de calidad e incrementar el porcentaje de reciclaje y recuperación de los materiales de construcción (ODS 11, 2015).

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado durante la investigación.

Al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme realizar esta investigación, así como el aporte de todos los docentes.

Al Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).

Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura UNAM.

Y al Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Posgrado UNAM.

## Referencias

- Armenta, C. A., Fierro, O. A., & Urías, C. H. L. (2018). Comportamiento mecánico de adoquines prefabricados con agregados reciclados provenientes de los residuos de la construcción. *Revista Ingeniería y Tecnología UAS*, 1(1), Art. 1.
- ASTM. (2022). American Society for Testing and Materials—ASTM International. <https://www.astm.org/>
- Centeno, P. E. M., Salazar, R. A. R., Urrego, Y. F. S., Jaramillo, N. A. Á., & Arjona, S. D. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. *Informador Técnico*, 78(2), 121-127. <https://doi.org/10.23850/22565035.95>
- CMIC. (2014). Buenos Manejos de Residuos de la Construcción. [https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/fichas\\_tecnicas.htm](https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/fichas_tecnicas.htm)
- CMIC. (2014). Gestión de residuos de construcción y demolición en Alemania. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. [https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/Alemania\\_BP.pdf](https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Fichas%20T%C3%A9cnicas/Alemania_BP.pdf)
- Concretos Reciclados S.A. de C.V. (2022). <http://www.concretosreciclados.com.mx/#1>
- Concretos Sustentables Mexicanos S.A. de C.V. (2022). CSMX. <https://csmx.mx/proyecto-1>
- Hafez, H., Kurda, R., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mustafa, R., & Ali, B. (2020). A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete. *Applied Sciences*, 10. <https://doi.org/10.3390/app10031018>
- IMCYC. (2006, julio). Los aditivos para concreto en seis pasos. *Construcción y Tecnología en Concreto*. <http://www.imcyc.com/revistact06julio06/TECNOLOGIA.pdf>
- IMCYC. (2022a). El cemento. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C. <http://www.imcyc.com/cemento/>
- IMCYC. (2022b). Laboratorio IMCYC - Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. <http://imcyc.com/app/?services=laboratorio>
- Kaarthik, M., y Maruthachalam, D. (2021). A sustainable approach of characteristic strength of concrete using recycled fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6377-6380. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.058>
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721-740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- M. Neville, A. (2013). *Tecnología del Concreto* (1. ed). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto: Arquine Ediciones.
- Martín-Morales, M. (2013). El residuo de construcción y demolición (RCD) como árido en la elaboración de prefabricados no estructurales [Dissertation/Thesis, Universidad de Granada]. TDX. <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.a.spx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10803.634372&lang=es&site=eds-live>
- Montiel Miguel, J. L., y Cottier Caviedes, J. L. (2017). Uso de agregados reciclados para la fabricación de adoquines que se puedan utilizar en la pavimentación de calles, avenidas y pasos peatonales. <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.a.spx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000759889&lang=es&site=eds-live>
- NMX-C-036-ONNCCE-2013.pdf. (s. f.).
- NMX-C-037-ONNCCE-2013.pdf. (s. f.).
- NMX-C-111-ONNCCE-2014.pdf. (s. f.).
- NMX-C-314-ONNCCE-2014.pdf. (s. f.).
- ODS 11. (2015). Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles | ONU-ODS. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- ONNCCE. (2022). ONNCCE. <https://www.onncce.org.mx/es/>
- ONU. (2022). Naciones Unidas. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- PAOT. (2022). PAOT. <https://paot.org.mx/>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación* (6.a ed.). MacGraw-Hill/Interamericana.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2019). Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México. Gobierno de la Ciudad de México. [https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPA/InventarioDeResiduosSolidosDeLaCiudadDeMexico\\_2019.pdf](https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPA/InventarioDeResiduosSolidosDeLaCiudadDeMexico_2019.pdf)
- Secretaría del Medio Ambiente. (2021). NACDMX-007-RNAT-2019. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. [http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX\\_007\\_RNAT\\_2019.pdf](http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf)
- SEDEMA. (2022). Secretaría del Medio Ambiente. Secretaría del Medio Ambiente. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx>
- Streaming IINGEN (2021, octubre 15). 1er Encuentro Latinoamericano de Residuos de la Construcción y Demolición. <https://www.youtube.com/watch?v=aCQNry7mMxQ>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, 656-666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>