

La modulación del concreto reciclado como estrategia de sustentabilidad en vivienda autoproducida

*Hace falta
título en inglés*

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i17.309>

ALBERTO MUCIÑO-VÉLEZ*

Universidad Nacional Autónoma de México

ORCID: [/0000-0002-6386-0249](https://orcid.org/0000-0002-6386-0249)

Correo electrónico: amucino@unam.mx

**Autor de correspondencia*

ANTONIO TAHUITON-MORA

Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: [0000-0003-0475-7097](https://orcid.org/0000-0003-0475-7097)

Correo electrónico: antoniotahton@unam.mx

CÉSAR ARMANDO GUILLÉN-GUILLÉN

Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: [0000-0002-2596-6122](https://orcid.org/0000-0002-2596-6122)

Correo electrónico: cguillen@unam.mx

Recepción: 3 de octubre de 2024 Aceptación: 28 de octubre de 2024

RESUMEN

Se exploró la pertinencia de la construcción modular y la aplicación de los concretos reciclados con el fin de caminar hacia sistemas constructivos para viviendas autoproducidas. Se pregunta si es posible emplear concreto reciclado en la autoconstrucción aplicando criterios constructivos de la modulación asociándola al concepto de sustentabilidad. Se utilizó un método exploratorio para analizar la construcción modular y el uso de residuos de la construcción y demolición en concretos estructurales. Se aplicó un método experimental considerando pruebas por compresión y tensión para evaluar resistencia y adherencia acero-concreto reciclado. Los resultados demuestran que es posible emplear materiales reciclados en concretos y obtener adecuada resistencia a compresión y adherencia con acero de refuerzo. Se discute que la modulación ofrece soluciones que permiten mejorar el manejo

de materiales, con lo que es posible optimizar la aplicación útil de los residuos de la construcción, y potenciar el uso de prefabricados de concreto reciclado. Pero se reconocen limitaciones normativas para la aplicación estructural, por la heterogeneidad de sus componentes, y que se debe llevar a cabo el proceso de maduración tecnológica y mejorar la durabilidad para garantizar la seguridad estructural de un prefabricado de concreto reciclado modulable. Se concluye que integrar conceptos de modulación y concretos reciclados prefabricados favorece el diseño de vivienda autoproducida.

Palabras clave: vivienda modular, diseño flexible, construcción sustentable

ABSTRACT

The relevance of modular construction and the application of recycled concrete was explored to



propose construction systems for self-produced homes. It is questioned whether it is possible to improve the inadequate handling of materials and use recycled concrete in self-construction by applying construction criteria of modulation. The scope of the document is to explore the relevance of modulation associating it with the concept of sustainability and evaluate recycled concrete for structural use. An exploratory method was used to analyze modular construction, recognizing the concepts of flexibility, and use of construction and demolition waste in structural concrete. An experimental method was applied considering compression and tension tests to evaluate strength and adhesion of steel-recycled concrete. The results show that it is possible to use recycled materials in concrete and obtain adequate compressive strength and adhesion with reinforcing steel. It is discussed that modulation offers solutions that allow improving materials management, making it possible to optimize the useful application of construction waste, enhancing the use of recycled concrete precast. But regulatory limitations are recognized for the structural application due to the heterogeneity of its components, and the technological maturation process must be carried out and durability improved to guarantee the structural safety of a modular recycled concrete precast. It is concluded that integrating modulation concepts and prefabricated recycled concrete favors the design of self-produced housing.

Keywords: modular housing, flexible layout, sustainable construction

INTRODUCCIÓN

Una de las características de la vivienda autoproducida en México es su proceso de consolidación en distintos periodos, en el cual el espacio construido va sufriendo modificaciones físicas sin control de calidad o cumplimiento de normas. Como resultado se obtienen sistemas estructurales vulnerables ante el cambio climático. Por tanto, es necesario construir viviendas que se

adaptan a los escenarios climáticos proyectados a un “desarrollo resiliente al clima” (PNUMA, 2023), mediante soluciones constructivas flexibles que optimicen el manejo de los materiales y sistemas estructurales, y que permitan lograr bajo impacto ambiental de los proyectos, sin incrementar de modo significativo los costos (Ribeirinho *et al.* 2020; Cairns y Jacobs, 2014). La sustentabilidad afronta los retos que implica el desarrollo de tecnología resiliente (McDonough y Braungart, 2002), pero no se ha abordado el concepto en vivienda de modo integral (Staib, Dörrhöfer y Rosenthal, 2008). Y, aunque se promueven estándares y normas con criterios sustentables, aún es limitada su aplicación y su nivel de profundidad en el tema de los concretos reciclados estructurales y su vinculación con sistemas constructivos para vivienda. Por este motivo se propone adoptar criterios constructivos modulares, con el fin de mejorar la calidad en el manejo de la materia prima y dirigidos a diseñar prefabricados de concreto reciclado para aplicarlos en la construcción de viviendas.

En este documento se discute el concepto de construcción modular asociando su proceso a la sustentabilidad, y se analizó residuos de la construcción y demolición (RCD), para conseguir sistemas estructurales de concreto reciclado que puedan ser una opción para la autoproducción de vivienda en la zona metropolitana de México. Se delimita la investigación a comprobar que es posible lograr concretos estructurales usando solamente agregados reciclados, y que asociando los criterios constructivos de la modulación se puede conseguir una mejora en la calidad de los concretos reciclados.

CONSTRUCCIÓN MODULAR

Históricamente, la modulación ha sido la respuesta para acelerar la construcción de edificios, y como opción ante desastres naturales o para desarrollar edificaciones de un modo más económico, al atender dimensiones que permiten portabilidad y garantizar un adecuado emplazamiento (Ribeirinho *et al.*, 2020). De las caracte-

rísticas de la construcción modular se destaca el concepto de flexibilidad, que da la pauta al crecimiento o decrecimiento de un espacio, mediante la estandarización de los componentes que generan agrupaciones modulares. La modulación debe seguir procesos de modo sencillo y seguro que permiten la repetición dentro de una trama o sistema de referencia, con el fin de facilitar la planificación y distribución espacial (José y Tollenaere 2005; Ulrich y Tung 1991; Miller y Elgard 1998; Taalman y Hunsicker 2002; Singh *et al.* 2015). Al atender la cuestión formal en el diseño modular, se destacan el cubo como la forma más eficiente para la distribución de espacios, y la esfera como la forma más segura ante condiciones de clima extremo (Taalman y Hunsicker 2002), lo que puede considerarse una posible opción formal en zonas vulnerables por cambio climático.

En este documento se buscan criterios de diseño para unidades volumétricas cúbicas que hagan posible el repetir y conectar entre sí cada elemento en distintas etapas. Para elaborar las distintas piezas de la envolvente se deben asociar materiales reciclados como materia prima por su disponibilidad en zonas metropolitanas, abriendo la posibilidad de emplear concretos reciclados (Pedro, Brito y Evangelista, 2018; 2017a; 2017b; Andreu y Miren, 2014).

MODULACIÓN COMO ESTRATEGIA DE SUSTENTABILIDAD

La sustentabilidad como requerimiento en LA construcción ha sido ampliamente discutida, y ha dado la pauta para el desarrollo de normas y estándares en búsqueda de prácticas responsables (McDonough y Braungart, 2002; Zeumer, Hegger y Stark, 2012). Pero la idea de asociar la modularidad y la sustentabilidad ha sido menos analizada (Cairns y Jacobs, 2014; Staib, Dörrhöfer y Rosenthal, 2008).

La modularidad se asocia con la sustentabilidad desde la sistematización de metas, con el fin de lograr la estandarización de componentes. Lleva implícito reducir la generación de residuos de construcción y lograr mayor calidad de sistemas

constructivos. La modularidad integra conceptos de seguridad y adaptabilidad, relacionados con la vivienda resiliente necesaria para afrontar el cambio climático; por tal motivo, un proceso de diseño que aplica la modulación contribuye a la sustentabilidad (Cairns y Jacobs, 2014; Staib *et al.*, 2008; McDonough y Braungart, 2002; Keeler y Burke, 2009; Crowther, 2018)

Colocar la opción de construir un espacio habitable prefabricado con materiales reciclados requiere entender el proceso constructivo para establecer la secuencia de diseño (Keeler y Burke, 2009), lo que implica realizar componentes de fácil colocación o retiro o reúso sin degradar las propiedades del material (Crowther, 1999). La literatura consultada sugiere que para el diseño de envolventes se deben generar elementos livianos que puedan ser manejables y de fácil transportación (Staib *et al.*, 2008; Kieran y Timberlake, 2008; Gershenson, Prasad y Allamneni, 1999).

CONCRETOS RECICLADOS

Se considera emplear concretos reciclados por la disponibilidad de residuos de la demolición y construcción (RCD) que se cuantifican anualmente en cientos de millones de toneladas; de ellos se destacan los agregados reciclados (AR) provenientes de concreto, mortero, cerámicos o materiales mixtos. Actualmente la regulación de RCD en construcción se encuentra restringida en concretos estructurales, y causa una búsqueda para mejorar su aprovechamiento desde su origen y transformación hasta el tratamiento de los AR, pero se han realizado estudios que han aplicado con éxito la incorporación de materiales reciclados en concretos (Abbas *et al.*, 2009; Pedro *et al.*, 2018; 2017a; 2017b; Andreu y Miren, 2014). Los retos del uso de AR en concretos estructurales es lograr adecuadas resistencias mecánicas y durabilidad (Erdem y Blankson, 2014). Para ello se busca disminuir el contenido de impurezas contenidas en los agregados reciclados, con lo que se han logrado óptimas resistencias mecánicas, (Berredjem, Arabi y Molez, 2020) además, con la ayuda de fluidificantes, superplastificantes

o reductores de agua es posible mejorar trabajabilidad y durabilidad, y conseguir resistencias a compresión específicas, aunque con un incremento en el costo de producción del material. Otro componente de ayuda en el contexto del reciclaje es el uso de las puzolanas residuales, que permiten rellenar las partes porosas de la pasta endurecida (Del Valle *et al.*, 2015), con lo que se limita la carbonatación del concreto y la oxidación del acero. Buenas prácticas en concretos reciclados han realizado sustituciones del 30% (Dilbas, Çakır, Şimşek, 2016; Gujel, Kazmierczak, Masuero, 2017; Tibbetts, Perry, Ferraro, Hamilton, 2018). Pero en este documento se pregunta si es posible lograr concretos estructurales con 100% de sustitución, reconociendo que la literatura consultada indica que a mayor AR en la mezcla la resistencia de diseño se ve afectada (Kou, 2006). Una posible solución se encuentra en usar una baja relación agua/cemento que provoque una matriz más resistente, considerando la presaturación de los agregados, para disminuir la absorción de agua superficial y de este modo favorecer la resistencia a compresión. (Malešev, Radonjanin y Marinković, 2010). Otros estudios sugieren utilizar solo agregados gruesos reciclados con agregados naturales para sustituciones parciales (Grupta, Soroj y Sommath, 2011; Otzuki, 2003). Las sustituciones parciales se consideran apropiadas para diversificar el uso de los agregados reciclados.

MÉTODO

Se utilizó un método exploratorio para conocer el estado del arte de la construcción modular y relacionar la modulación con criterios de edificación sustentable empleando concretos reciclados; con esta información se propone un sistema constructivo utilizando bovedilla y muros de concreto reciclado. Se utiliza un diseño de mezcla con 100% de sustitución, aplicando el método del American Concrete Institute (ACI) con dos diseños testigo, donde se emplearon agregados naturales con el fin de contrastar resultados. Pos-

teriormente se realizaron sustituciones del 50% combinando arenas y gravas naturales con los agregados reciclados. Se valoró obtener mezclas para elaborar probetas cúbicas con una resistencia de 15 MPa para ensayarse a compresión a los 7, 14 y 28 días. Con la prueba de tensión se busca evaluar la adherencia para verificar que no existieran cambios significativos entre concreto convencional y reciclado al interactuar con el acero de refuerzo. No existe una prueba normalizada para conocer el grado de adherencia; por tal motivo, se elaboraron probetas cilíndricas con una varilla al centro que fue sometida a esfuerzos de tracción a los 7, 14 y 28 días. Se realiza un análisis de la densidad de los concretos reciclados y convencionales para determinar si existe disminución de peso. Para la propuesta de un espacio habitable se propone una trama en función del sistema vigueta y bovedilla para generar posibilidades de modulación.

Para la elaboración de las probetas ensayadas a compresión se utilizaron moldes metálicos cúbicos de 5 cm, acordes con la norma ASTM-C-109. Para las probetas cilíndricas se usaron moldes cilíndricos con relación dos a uno, con una varilla embebida. La dosificación de los materiales fue por peso, el cual se midió en una báscula electrónica con una sensibilidad de 0.01 g. Las probetas se midieron con un vernier con una exactitud de 0.01 mm.

Para determinar la curva granulométrica de las arenas se manejó una tamizadora Retsh modelo AS 200 Basic y un juego de tamices de las mallas 3/8", #4, #8, #16, #30, #50 y #100, como se establece en la norma ASTM-C-33. El tamaño máximo nominal de los agregados gruesos se obtuvo acorde con la norma NMX-C-077-ONNCCE-2019; para la densidad y el porcentaje de absorción de agua de las gravas se siguió las recomendaciones de la NMX-C-164-ONNCCE-2014; para el peso específico y el porcentaje de absorción de agua de las arenas se consultó la NMX-C-165-ONNCCE-2020, y para el módulo de finura la ASTM C-33.

Las pruebas mecánicas se llevaron a cabo en una máquina de pruebas universales marca Instron modelo 400RD-E1-H2 con capacidad de

200 t, la cual cuenta con un software que ejecuta los cálculos de la carga aplicada entre el área de contacto y da el valor del esfuerzo en MPa. El ensayo de compresión axial se basó en la norma ASTM C-109.6

MATERIALES

Los materiales para la experimentación fueron cemento gris Portland tipo II resistente a sulfatos; como agregados pétreos finos y gruesos naturales se utilizaron dos tipos, caliza triturada y agregados de río. Los agregados reciclados son producto de la trituración de concretos y morteros adquiridos de una planta de reciclaje de resi-

duos de la construcción para su transformación en materiales pétreos reciclados atendiendo a los parámetros establecidos en la tecnología del concreto (Steven, 2004). Los materiales son comercializados en la ciudad de México; por tanto, son accesibles, y fueron almacenados de modo hermético para controlar la interacción con el medio. Para la elaboración de las mezclas se utilizó agua suministrada de la red pública sin materia orgánica. En la tabla 1 se colocan los atributos de los agregados utilizados para realizar el diseño de mezclas. Para las pruebas de adherencia se empleó varilla corrugada de ½” de diámetro grado 42 en conformidad con la NMX-B-506-CANACERO-2019.

TABLA 1
Atributos de los agregados

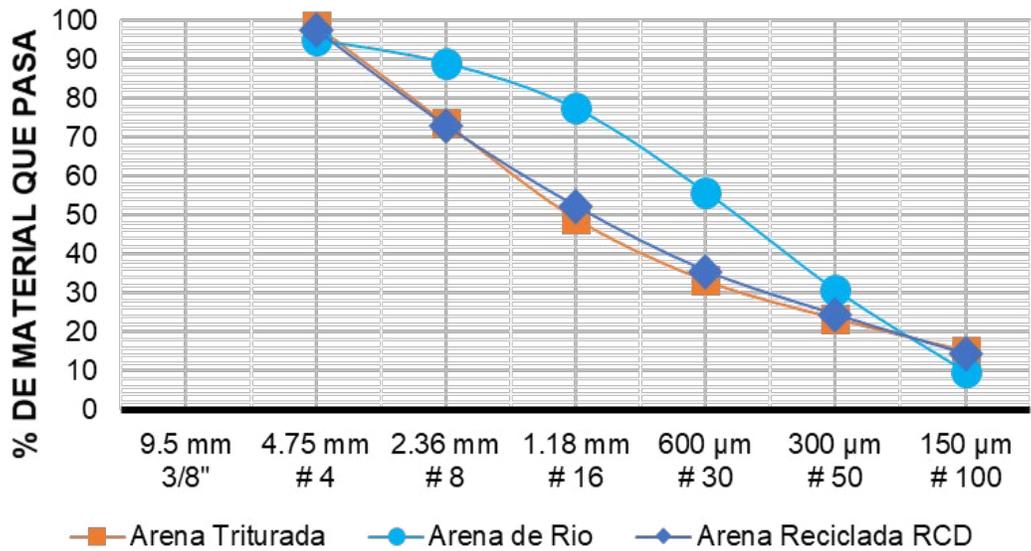
Atributos	Tipos de agregados					
	Arena caliza	Grava caliza	Arena río	Grava río	Arena RCD	Grava RCD
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1541	1352	1380	1406	1213	1000
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1665	1468	1515	1537	1317	1109
Peso específico (kg)	2589	2732	2346	2672	2049	2337
Módulo de finura	2.93	N/A	3.58	N/A	2.97	N/A
Tamaño máximo nominal	N/A	¾’’	N/A	¾’’	N/A	1’’
% Absorción	3.24%	0.042%	3.54%	1.00%	15.52%	9.712%
% Humedad	0.05%	0.003%	0.58%	0.005%	4.4%	2.144%

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica 1 demuestra que los agregados reciclados finos tienen similitud con las arenas calizas trituradas en su distribución de granos y se califican dentro de los parámetros establecidos por la norma, al llevar un proceso de elabora-

ción basado en el control de distribución de los tamaños de partículas, como establece la NMX-C-077-ONNCCE-2019. Los rangos de tamaños de las arenas recicladas cumplen los requisitos para ser empleadas en mezclas de concreto.

GRÁFICA 1
Curva granulométrica de las arenas

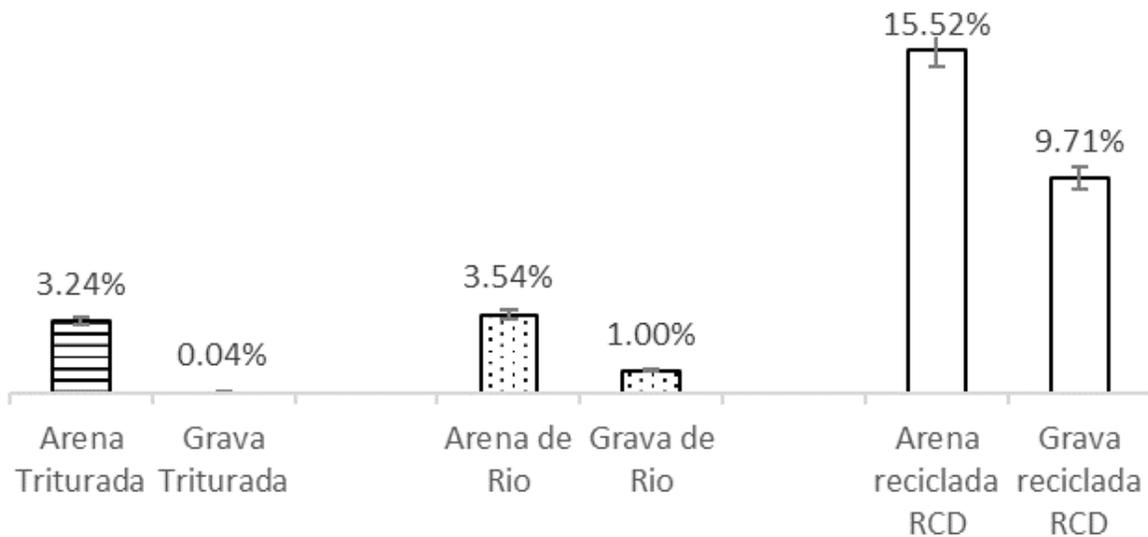


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 2 se observa que los agregados reciclados tienen un mayor porcentaje de absorción de humedad; se destaca el 15,52% de las arenas recicladas. Lo anterior determinó el

ajuste por absorción de humedad en el diseño de mezcla y el reconocimiento de que las gravas trituradas representan una mayor oportunidad de sustitución que las arenas recicladas.

GRÁFICA 2
Porcentaje de absorción de los agregados



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2 se identifica la nomenclatura utilizada por los diseños de mezcla M1 con agregados calizos triturados, M2 con agregados de río y M3 con agregados reciclados considerando 100% de

sustitución. Las mezclas M1 y M2 son testigos para comparar con el diseño que empleó el 100% de sustitución (mezcla M3).

TABLA 2
Identificación de contenidos de mezclas por agregados

Clave	Agregado	M1	M2	M3
		% de sustitución		
		0%	0%	100%
A1	Arena caliza	A1	-	-
A2	Arena de río	-	A2	-
A3	Arena RCD	-	-	A3
G1	Grava caliza	G1	-	-
G2	Grava de río	-	G2	-
G3	Grava RCD	-	-	G3
C	Cemento			
W	Agua			

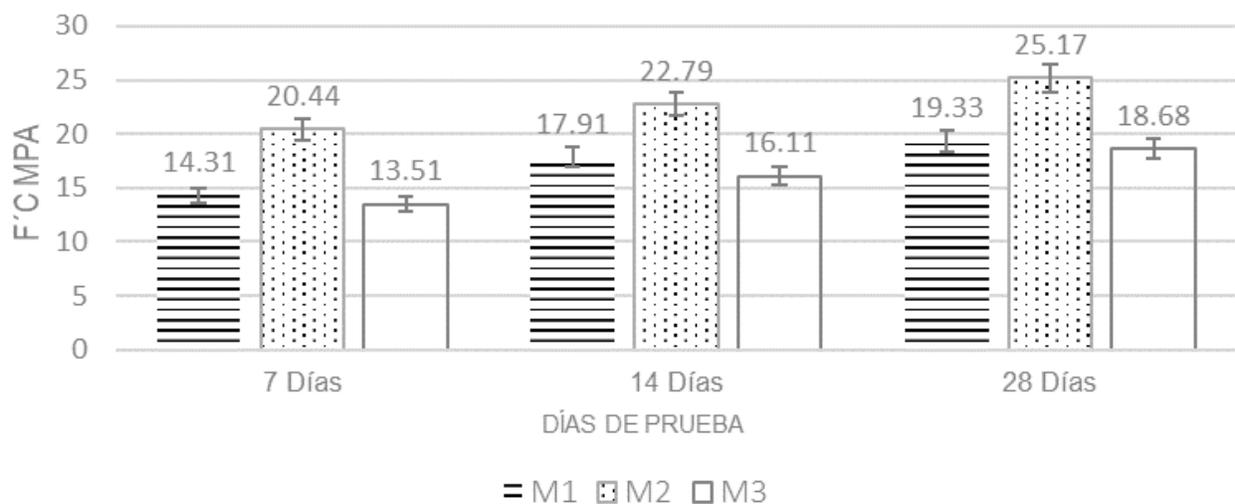
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN MECÁNICA

Los resultados de la gráfica 3 determinan que es posible obtener diseños de mezcla satisfactorios para desempeños mecánicos estructurales para uso en prefabricados de concreto empleando

sustituciones del 100% al obtener 18 MPa a los 28 días. Se observa similitud entre las mezclas M1 y M3 en la evolución de la resistencia a los 7, 14 y 28 días.

GRÁFICA 3
Resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días



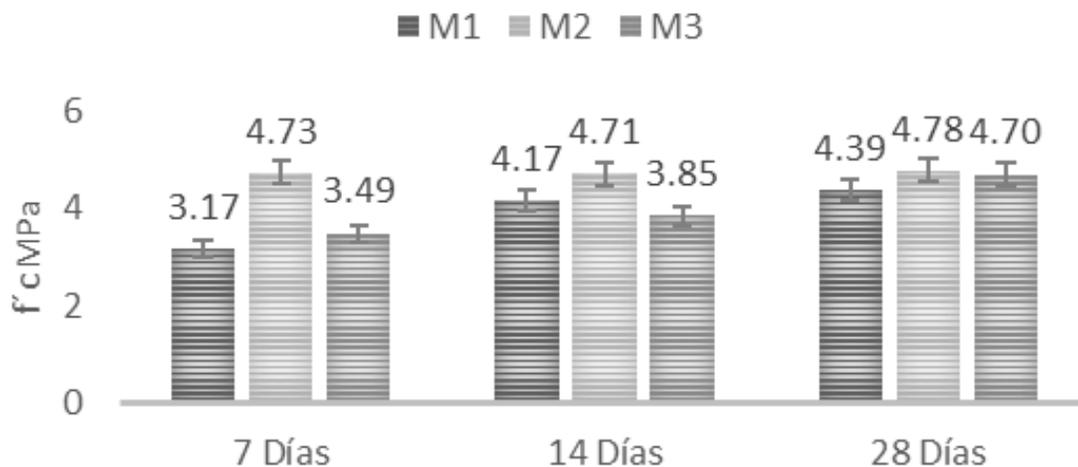
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados en la gráfica 4 de las pruebas de tracción muestran que no existe diferencia significativa entre las resistencias a la tensión obtenidas de las probetas a los 28 días. Pero se destaca que los concretos reciclados (M3) superaron en resistencia a la tracción (4.70 MPa) a la probeta

testigo M1 (4.39 MPa) a los 28 días. El acero de refuerzo mantiene una adherencia similar con las tres mezclas evaluadas, lo que establece la posibilidad de adecuada interoperabilidad del acero de refuerzo con los concretos reciclados en esfuerzos a tracción.

GRÁFICA 4

Comparación de resistencia a tracción para determinar adherencia



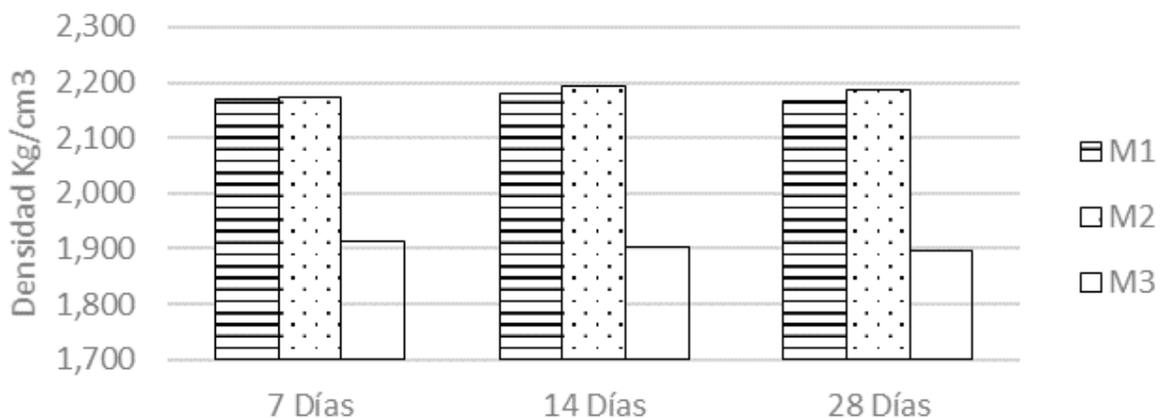
Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 5 se valoró la densidad de las mezclas a distintas edades y se determinó que la mezcla de concreto reciclado M3 resulta ser más liviana, al registrar un promedio de densidad de 1895 kg/cm³, en comparación con los 2165 kg/cm³

de un concreto convencional realizado con agregados naturales M1. Un concreto reciclado es, por tanto, más ligero que un concreto convencional y aporta menor carga a la estructura, lo que permite su aplicación en envolventes arquitectónicas.

GRÁFICA 5

Densidad de las mezclas a distintas edades



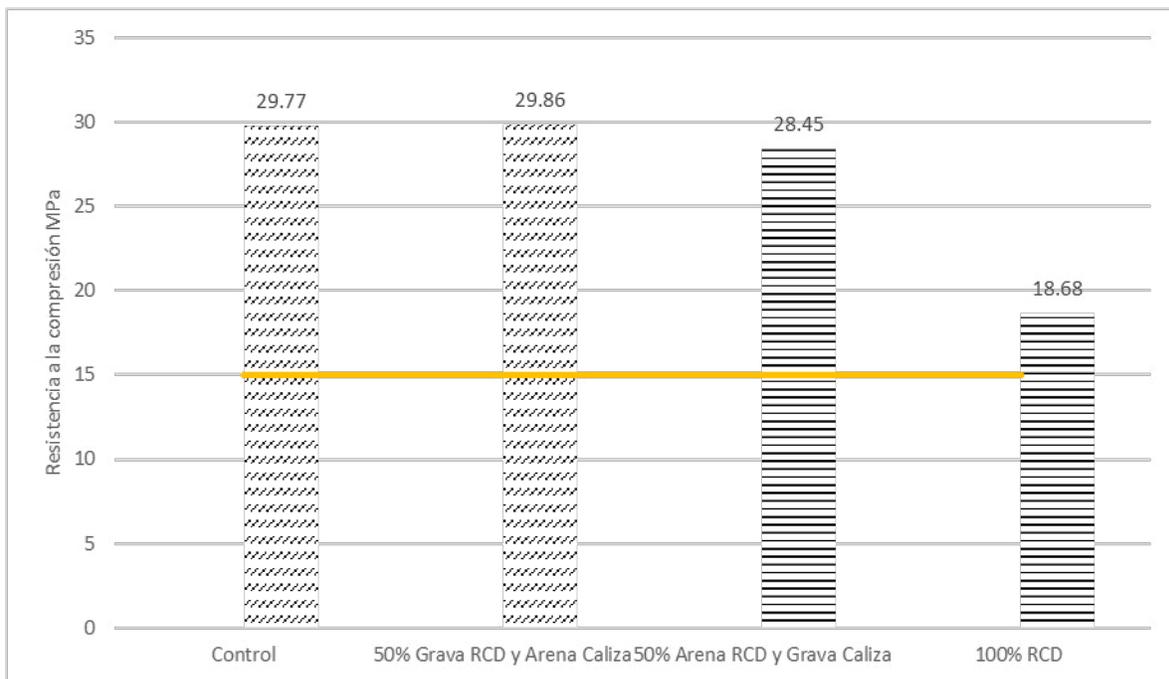
Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 6 se realizó la comparación del desempeño de concretos reciclados empleando sustituciones del 50%, considerando sustituir gravas y arenas recicladas con los agregados triturados de calizas y de río y comparar con la sustitución del 100 % de agregados reciclados. Los resultados demuestran que existe mejor operabilidad entre gravas recicladas y arenas naturales. También se discute que es posible alcanzar

resistencias mecánicas más elevadas con sustituciones del 50%, lo cual abre la posibilidad de uso de los concretos reciclados en viguetas y capa de compresión, así como en de muros de carga y divisorios al emplear sustituciones parciales de agregados reciclados, por superar los 15 MPa que establece la normatividad en prefabricados de concreto. (ONNCCE, 2019)

GRÁFICA 6

Diseños de mezcla combinando agregados naturales con reciclados



Nota: La línea azul expresa la resistencia mínima buscada en bovedillas y muros de acuerdo a las normas NMX-C-406-ONNCCE-2019 y NMX-C-403-ONNCCE-1999.

Fuente: Elaboración propia.

INTEGRACIÓN DE CONCEPTOS

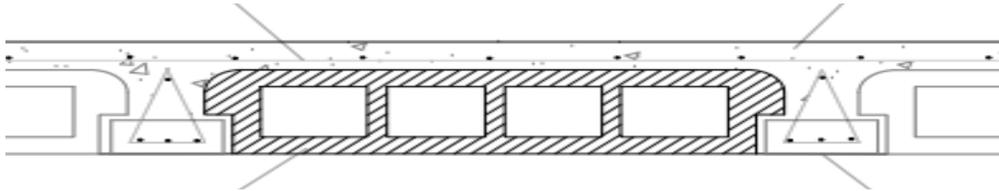
En México se regula la construcción de los prefabricados de concreto bajo las normas NMX-C-406-ONNCCE-2019, además de la NMX-C-403-ONNCCE-1999; para el caso del sistema vigueta y bovedilla se determina una resistencia de 25 MPa para las viguetas, 15 MPa para las bovedillas, de 20MPa para la capa de compresión y para muros de 10 MPa, con refuerzo en los bordes para vivienda de hasta

dos niveles (en esta investigación se analizó el uso de muros con resistencia de 15 MPa). Atendiendo a los resultados obtenidos de 18MPa con 100% de sustitución, es posible elaborar muros de concreto reciclado de acuerdo con la norma, considerando también que se consiguieron adecuadas interacciones con los refuerzos verticales en pruebas a tensión, por lo que es posible integrar muros de concretos reciclados con acero de refuerzo. Por tanto, se propone configurar un módulo habitable

de prefabricados de concreto reciclado empleando muros con prefabricados de bovedilla (figura 1). Cabe señalar que, si bien con el sistema de

vigueta y bovedilla es posible la modulación, el sistema requiere una capa de compresión que no permitiría la deconstrucción.

FIGURA 1
Bovedilla



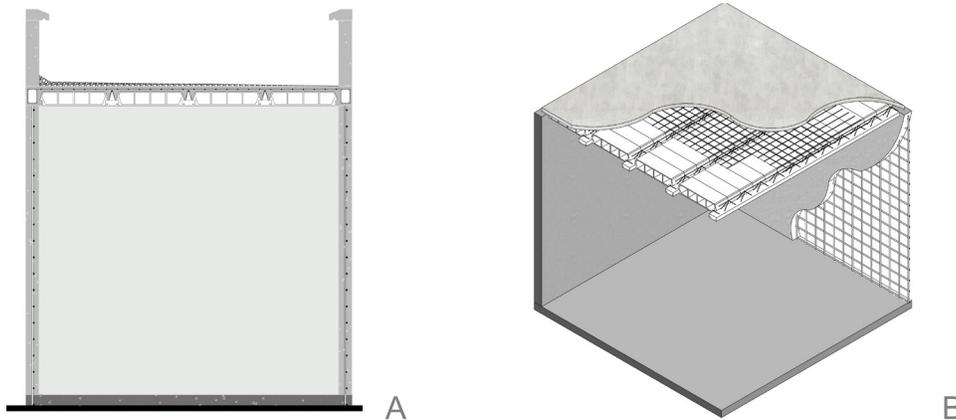
Fuente: Elaboración propia.

En muros se propone un prototipo de concreto reciclado estructural con refuerzos de borde empleando un espesor de 15 cm, armados con varilla de 1/2" para resistir 15MPa. En la figura 2 se representa un corte esquemático (figura 2A) del módulo, donde se identifican las piezas y la configuración de componentes. En la figura 2 B se des-

cribe el sistema destacando el uso de la bovedilla y los muros como los elementos prefabricados de concreto reciclado. El prototipo espacial se establece de las siguientes medidas: *altura*: 2.70 m, *ancho*: 3.41 m *longitud*: 13.64 m - 20.46 m, con la posibilidad de configurar una *altura total* de 1 a 2 pisos.

FIGURA 2

(A) Módulo habitable con RCD. (B) Isométrico.



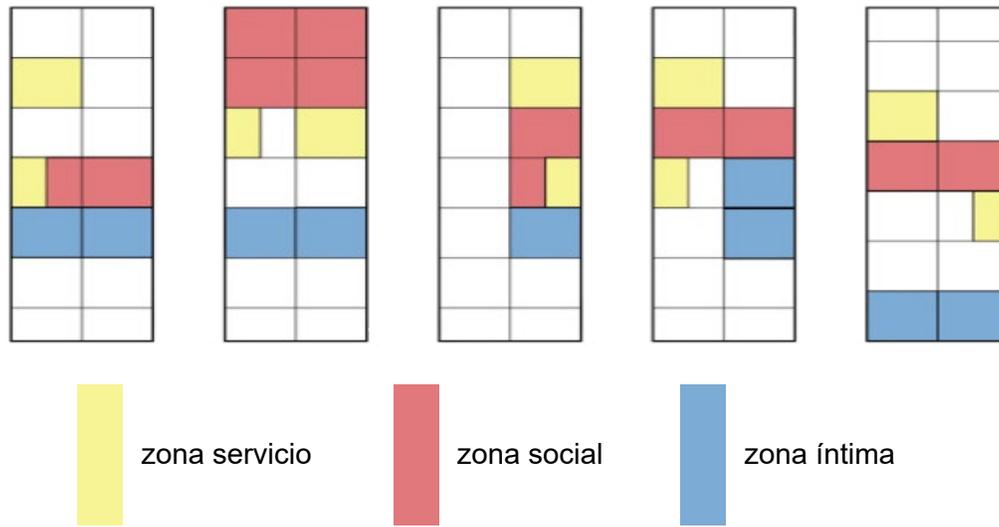
Fuente: Elaboración propia.

Se definió una modulación de 3.41 m x 3.41 m basada en la modulación de vigueta y bovedilla, para configurar una retícula de espacios habita-

bles de concreto reciclado que permita la flexibilidad en la distribución (figura 3).

FIGURA 3

Esquema de distintas posibilidades de distribución por zonas



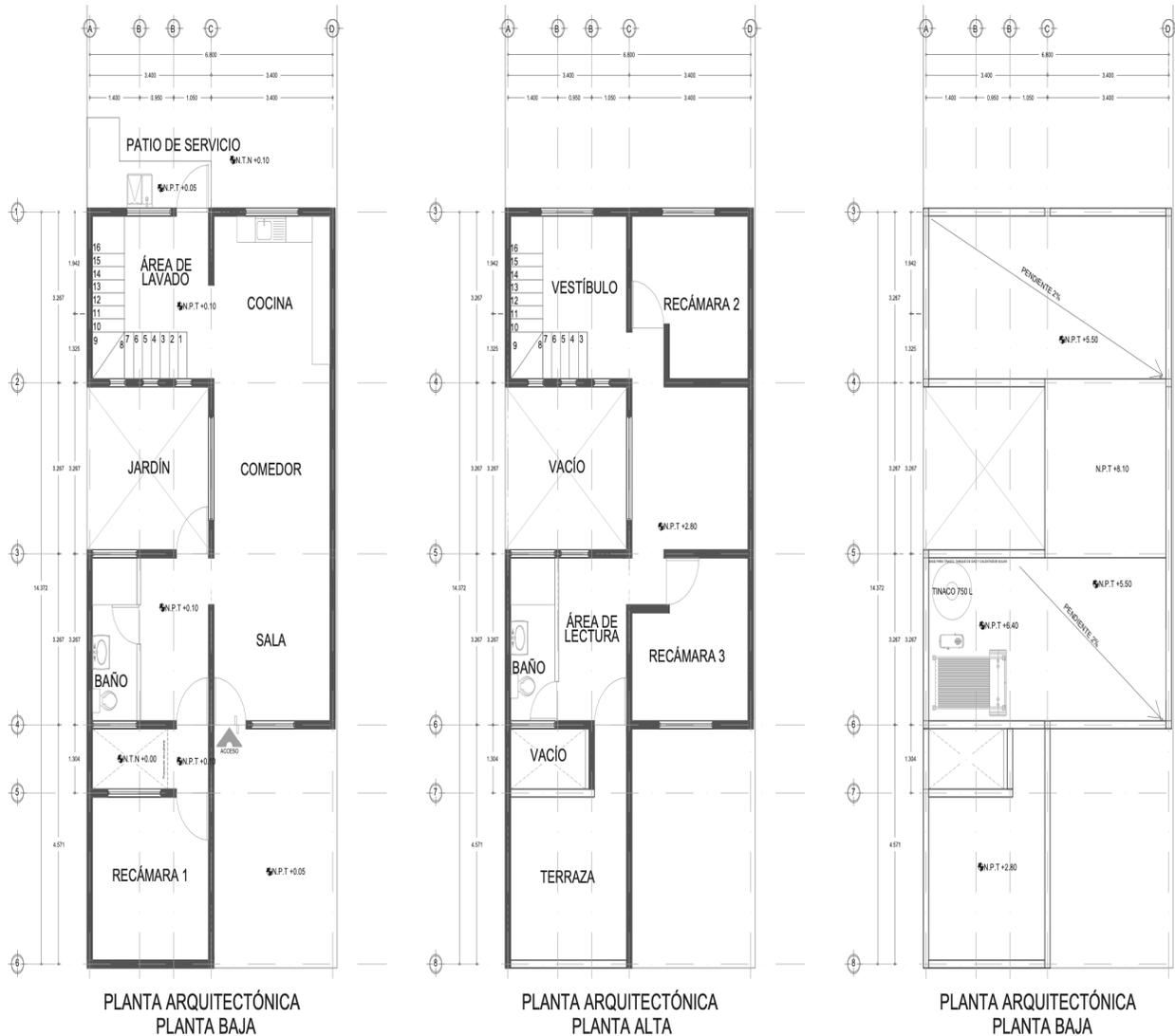
Fuente: Elaboración propia.

La figura 3 es un esquema que representa un criterio de distribución del módulo propuesto, y establece zonificaciones de espacios para diferenciar el uso. El color rojo se define para zonas íntimas, el color amarillo para zonas de servicio y el color azul para zonas sociales. El propósito de la figura es representar las posibilidades que pueden existir para la configuración de espacios habitables; de este modo el usuario decide sobre

la distribución espacial con opción a crecimiento progresivo.

En la figura 4 se describe una de las posibilidades de distribución espacial para configurar una vivienda que incluya muros prefabricados de concreto reciclado. El fin es poder incluir materia prima reciclada en proyectos modulares destinados a la autoproducción de vivienda.

FIGURA 4
Proyecto modular a base de RCD



Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

La construcción modular da la pauta a incluir residuos de la construcción, lo que lleva a reducir el consumo de materiales y mejorar la calidad de aplicación de recursos primarios reciclados (Lacey *et al.*, 2017; Smith, 2010; Arisya y Suryantini, 2021; Wilson, 2019). Por ello se asocia la modulación a un proceso sustentable porque permite simplificar procesos especializados, lo que facilita el uso final de un prototipo y mejorar la cali-

dad de los componentes de la vivienda. (Miller y Elgard 1998; Smith, 2010).

En la autoproducción de vivienda se debe garantizar la calidad de los materiales y brindar seguridad en la estructura para consolidar espacios habitables. Se demostró que es posible lograr resistencias aptas para ser empleadas en muros al conseguir 18 MPa en concretos reciclados con 100% de sustitución y al obtener adecuado grado de adherencia con el acero de refuerzo, cuando se compararon resultados con probetas testigo. Con

sustituciones del 50% sería posible diseñar prefabricados con mayores prestaciones mecánicas, además de conseguir baja densidad en relación con los concretos convencionales, y definir la posibilidad de desarrollar prototipos de concreto reciclado más livianos. Los diseños de mezcla de concretos reciclados se pueden utilizar siguiendo las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI) para que la prefabricación de los prototipos de muros garanticen dimensiones, resistencia mecánica y calidad acorde con los criterios de la construcción modular (Combes y Bellomio 1999).

Los resultados de las pruebas mecánicas empleando sustituciones totales y parciales demuestran el potencial de aplicar concretos reciclados en sistemas constructivos con resistencias diferenciadas, sobre la base de lo obtenido en los resultados a compresión de la gráfica número 6.

Como retos a resolver, se encuentra el tema de durabilidad y de reducción del consumo de agua al fabricar la mezcla. Se debe explorar la porosidad del agregado reciclado al incorporarlo a mezclas, para evitar inadecuadas interacciones del concreto reciclado con el ambiente que propicien afectaciones en el sistema constructivo. Ello se puede solucionar con el uso de aditivos que mejoren la condición inicial de los agregados reciclados.

CONCLUSIONES

Se propone el uso de agregados reciclados con 100% de sustitución para elaborar prefabricados de concreto que sirvan en proyectos de vivienda autoproducida con criterios de modulación. Se presentan las siguientes conclusiones:

Se elaboró un diseño de mezcla para concreto reciclado considerando una sustitución del 100% de agregados y se obtuvieron resistencias mecánicas apropiadas, al superar los 18 MPa, lo que determina la participación de concretos reciclados en los prefabricados de muros.

Los resultados de la interoperabilidad del acero de refuerzo con concretos reciclados al 100% de sustitución presentaron un comportamiento similar al que se da entre concretos convencionales y acero de refuerzo. Se concluye que, al comparar esfuerzos a tracción, no existe diferencia significativa entre las probetas evaluadas.

En la valoración de densidad, las mezclas recicladas resultaron ser más livianas que las mezclas de concreto elaborado con agregados naturales. Se concluye que el concreto reciclado es más liviano que el concreto convencional.

Al realizar sustituciones del 50% de agregados reciclados con agregados naturales es posible mejorar el desempeño mecánico a la compresión. Ello permite el diseño de prototipos con mayores solicitaciones mecánicas.

La construcción modular abre la posibilidad de desarrollar tecnología para la vivienda empleando prefabricados elaborados a partir de materia prima reciclada, lo que, mediante las premisas de calidad en el manejo de materiales, potencializa mejorar la aplicación útil de los concretos reciclados (Keeller y Burke, 2009).

Desarrollar vivienda modular cobra relevancia en asentamientos en zona de riesgo o susceptible ante fenómenos naturales, porque el proceso constructivo modular disminuye el riesgo de pérdidas materiales en espacios habitables, lo que conlleva planeación e involucra la discusión sistémica de los componentes y condicionantes que influyen en la generación de asentamientos humanos resilientes.

Se concluye que mediante la prefabricación es posible diseñar sistemas apropiados para garantizar seguridad con un mínimo de desperdicio, con la posibilidad de personalizar la distribución, y sobre todo para mejorar la calidad de vida, al atender la vulnerabilidad estructural de la autoproducción de vivienda. Se continuarán los experimentos en pruebas mecánicas y de durabilidad a muros de concreto reciclado con sustituciones totales y parciales. Se desarrollarán prototipos tecnológicos de concreto y mortero reciclado enfocados en la vivienda autoproducida, para

fomentar más el uso de los agregados reciclados en la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Al CONHACYT, por el financiamiento del proyecto Ciencia de Frontera CF-2023-I-208 Reintegración de residuos de la construcción y demolición RCD, para la generación de un sistema constructivo de vivienda sustentable.

REFERENCIAS

- Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O. B., Razaqpur, A. G., Fournier, B. & Foo, S. (2009). Durability of Recycled Aggregate Concrete Designed with Equivalent Mortar Volume Method. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 555-563. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012>
- Andreu, G. & Miren, E. (2014). Experimental Analysis of Properties of High Performance Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227-235. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.054>.
- Arisya, K. F. and Suryantini R. (2021). Modularity in Design for Disassembly (DfD): Exploring the Strategy for a Better Sustainable Architecture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 738(1), 012024. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/738/1/012024>
- ASTM C-109 (2002). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens, West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C-33 (1999). Especificación Estándar para Agregados para Concreto, ASTM International.
- Berredjem, L., Arabi, N. & Molez, L. (2020). Mechanical and Durability Properties of Concrete Based on Recycled Coarse and Fine Aggregates Produced from Demolished Concrete. *Construction and Building Materials*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
- Cairns, S. & Jacobs, J. M. (2014). *Buildings must die: A Perverse View of Architecture* (pp. 1885-1960). Cambridge, MA: MIT Press.
- Combes, L. & Bellomio, A. (1999). Creativity and Modularity in Architecture. In *AVOCAAD Second International Conference Proceedings* (pp. 160-171). Disponible en: <https://papers.cumincaad.org/data/works/att/13ac.content.06957.pdf#page=160>
- Crowther, P. (1999). Design for Disassembly to extend Service Life and increase Sustainability. *Durability of Building Materials and Components 8: Service Life and Asset Management*, 1983-1992. Disponible en: <https://eprints.qut.edu.au/2471/1/Crowther-8dbmc.PDF>
- (2018). Re-valuing Construction Materials and Components through Design for Disassembly. In *Unmaking Waste in Production and Consumption: Towards the Circular Economy* (pp. 309-321). Emerald Publishing Limited.
- Dilbas, H., Çakır, Ö. & Şimşek, M. (2017). Recycled Aggregate Concretes (RACs) for Structural Use: An Evaluation on Elasticity Modulus and Energy Capacities. *International Journal of Civil Engineering*, 15, 247-261. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40999-016-0077-3#citeas~:text=DOI-,https%3A//doi.org/10.1007/s40999%2D016%2D0077%2D3,-Keywords>
- Erdem, S. & Blankson, M. (2014). Environmental Performance and Mechanical Analysis of Concrete Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP) and Waste Precast Concrete as Aggregate. *Journal of hazardous materials*, 264, 403-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.040>.
- Gershenson, J. K., Prasad, G. J. & Allamneni, S. (1999). Modular Product Design: A Life-cycle View. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 3(4), 13-26.
- Gujel, D. A., Kazmierczak, C. S. & Masuero, J. R. (2017). Stress-strain Curve of Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Analysis of the NBR 8522 Methodology. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 10(3), 547-567. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000300002>
- Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2012). *Energy Manual: Sustainable Architecture*. Walter de Gruyter.
- José, A. y Tollenaere M. (2005). Métodos modulares y de plataforma para el diseño de familias de productos: análisis de la literatura. *Revista de*

- Fabricación Inteligente* 16(3): 371–390. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10845-005-7030-7>
- Keeler, M. & Vaidya, P. (2016). *Fundamentals of Integrated Design for Sustainable Building*. John Wiley & Sons.
- Kieran, S. & Timberlake, J. (2008). *Loblolly House: Elements of a New Architecture*. Princeton architectural press.
- Kou, S. (2006). Reusing Recycled Aggregates in Structural Concrete.
- Kwan, W. H., M. Ramli, K. J. Kam, M. Z. Sulieman (2012). Influence of the amount of Recycled Coarse Aggregate in Concrete Design and Durability Properties, *Construction and Building Materials* 26, 565-573 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>
- Lacey, Andrew, Wensu Chen, Hong Hao and Kai-ming Bi (2017). Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, 6: 45–56. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.008>
- Malešev, M., Radonjanin, V. & Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2(5), 1204-1225.
- Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C. & González-Valdez, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *Revista Alconpat*, 5(3), 235-248. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s2007-68352015000300235&script=sci_arttext
- McDonough, W. & Braungart, M. (2010). *Cradle to Cradle: Remaking the Way we make Things*. North Point Press.
- Miller, Thomas y Per Elgård (1998). Definición de módulos, modularidad y modularización. *Actas del 13º Seminario de Investigación IPS* 19.
- NMX-C-077-ONNCCE-2019 (2019). Agregados para concreto – Análisis granulométrico, México, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-164-ONNCCE-2014 (2014). Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso, CDMX, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-165-ONNCCE-2014 (2014). Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino, CDMX, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-406-ONNCCE-2019 (2019). Industria de la Construcción-Componentes Estructurales Prefabricados de Concreto para sistemas de Losas-especificaciones y Métodos de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Construcción y Edificación,
- NMX-C-403-ONNCCE-1999 (2017). Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para uso estructural-, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-414-ONNCCE-2017 (2017). Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo, México, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Otsuki, N., Miyazato, S. I. & Yodsudjai, W. (2003). Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 443-451.
- Pedro, D., Brito, J. & Evangelista, L. (2017a). Mechanical Characterization of High-performance Concrete Prepared with Recycled Aggregates and Silica Fume from Precast Industry. *Journal of Cleaner Production*, 164, 939-949. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.249>.
- , ———, ——— (2017b). Structural Concrete with Simultaneous Incorporation of Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates: Mechanical, Durability and Long-term Properties. *Construction and Building Materials*, 154, 294-309. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.215>.
- , ———, ——— (2018). Durability Performance of High-performance Concrete Made with Recycled Aggregates, Fly Ash and Densified Silica Fume. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.07.002>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNMUA, 2023). Informe sobre la brecha de emisiones 2023. Disponible en: <https://www.unep.org/es/resources/informe-so>

- [bre-la-brecha-de-emisiones-2023](#). Consultado: 5 de julio de 2024.
- Ribeirinho, Maria João, Jan Mischke, Gernot Strube, Erik Sjödin, José Luis Blanco, Rob Palter, Jona Biörck, David Rockhill y Timmy Andersson (2020). La próxima normalidad en la construcción: cómo la disrupción está remodelando el ecosistema más grande del mundo. *McKinsey y compañía*. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>. Consultado: 1 de julio de 2024.
- Singh, Manav Mahan, Anil Sawhney and André Borrmann (2015). Modular Coordination and BIM: Development of Rule Based Smart Building Components. *Procedia Engineering* 123: 519–527. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.104>
- Smith, R. E. (2010). *Arquitectura prefabricada: una guía para el diseño y la construcción modulares*. Ney Jersey: John Wiley & Sons.
- Staib, G., Dörrhöfer, A. & Rosenthal, M. (2008). *Components and Systems: Modular Construction-design, Structure, New Technologies*. De Gruyter.
- Taalman, Laura and Eugénie Hunsicker (2002). Simplicity is Not Simple. *Math Horizons* 10(1): 5–9. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10724117.2002.11974601>
- Tibbetts, C. M., Perry, M. C., Ferraro, C. C. & Hamilton, H. R. (2018). Aggregate Correction Factors for Concrete Elastic Modulus Prediction. *ACI Structural Journal*, 115(4). Disponible en: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=51701914#:~:text=DOI%3A%2010.14359/51701914>
- Wilson, James (2019). Design for Modular Construction: An Introduction for Architects. *AIA American Institute of Architects (AIA)*. Disponible en: <https://www.aia.org/resources/6119840-modular-and-off-site-construction-guide>. Consultado: 3 de enero de 2023.