











Economía circular en la industria de la construcción por impresión 3D: una solución de diseño, durabilidad, materiales y procesos para lograr la vivienda digna, asequible y sostenible en Nuevo León y México

J. M. Mendoza-Rangel , J. R. Zapata-Padilla , F. D. Anguiano-Pérez ,
M. I. Velásquez-Hernández , S. Mares-Chávez , E. E. Espino-Robles , J. I. Alvarado-López
, M.A. López-Serna , J. A. Mendoza-Jiménez , J. H. Díaz-Aguilera* 

*Autor de Contacto: jhda_ic24@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>

Recibido: 22/04/24 | Correcciones recibidas: 10/05/2024 | Aceptado: 14/05/2024 | Publicado: 15/05/2024

RESUMEN

Esta revisión de la impresión 3D de materiales cementantes (I3DMC) evalúa su idoneidad para construir Vivienda Digna, Asequible y Sostenible (ViDAS) en México, considerando los requerimientos mecánicos, por durabilidad y sostenibilidad. La crisis climática y económica son retos actuales para una Industria de la Construcción Circular, pero la I3DMC reduce hasta 88%, 50%, 70% y 90% las emisiones de CO₂, materiales y desechos, mano de obra, tiempos y costos, respectivamente, alcanzando la resistencia y durabilidad de la construcción convencional. Asimismo, existen empresas de I3DMC en países desarrollados, pero importar esta tecnología a países en desarrollo es poco asequible, por tanto, la investigación de tecnologías de I3DMC está en curso en Nuevo León, México, permitiendo la construcción de ViDAS por \$1,700-\$4,500/m².

Palabras clave: economía circular; impresión 3d de materiales cementantes; vivienda digna, asequible y sostenible; diseño eficiente; propiedades mecánicas y de durabilidad.

Citar como: Mendoza-Rangel, J. M., Zapata-Padilla, J. R., Anguiano-Pérez, F. D., Velásquez-Hernández, M. I., Mares-Chávez, S., Espino-Robles, E. E., Alvarado-López, J. I., López-Serna, M.A., Mendoza-Jiménez, J. A., Díaz-Aguilera, J. H. (2024), “Economía circular y la industria de la construcción por impresión 3D: una solución de diseño, durabilidad, materiales y procesos para lograr la vivienda digna, asequible y sostenible en México”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 115 – 140, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Nuevo León, México.

Contribución de cada autor

J.M. Mendoza-Rangel: conceptualización, recursos, supervisión y administración del proyecto. J.H. Díaz-Aguilera: idea original, recolección de datos (60%), escritura del trabajo y discusión del trabajo (60%). J.R. Zapata-Padilla, S. Mares-Chávez, F.D. Anguiano-Pérez, M.I. Velásquez-Hernández, E.E. Espino-Robles, J.I. Alvarado-López y J.A. Mendoza-Jiménez contribuyeron con la revisión, edición, recolección de datos y discusión del trabajo en porcentajes iguales.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2024.

Circular economy in the 3D printing construction industry: a design, durability, materials, and processes solution to achieve decent, affordable, and sustainable housing in Nuevo León and Mexico

ABSTRACT

This review of 3D-printing of cementitious materials (3DPCM) evaluates its suitability to build Decent, Affordable and Sustainable Housing (DASH) in Mexico, considering mechanical requirements, durability, and sustainability. The climate and economic crises are current challenges for a Circular Construction Industry, but the 3DPCM reduces CO₂ emissions, materials and waste, labor, times and costs by up to 88%, 50%, 70% and 90%, respectively, achieving the strength and durability of conventional construction. Likewise, there are 3DPCM companies in developed countries, but importing this technology to developing countries is not affordable, therefore, research into 3DPCM technologies is ongoing in Nuevo León, Mexico, allowing the construction of DASH for \$1,700-\$4,500/m².

Keywords: circular economy; 3d-printing of cementitious materials; decent, affordable and sustainable housing; efficient design; mechanical and durability properties.

Economia circular na indústria de construção por impressão 3D: uma solução de design, durabilidade, materiais e processos para alcançar habitação digno, acessível e sustentável em Nuevo León e no México

RESUMO

Esta revisão da impressão 3D de materiais cimentícios (I3DMC) avalia sua adequação para construir Habitações Decentes, Acessíveis e Sustentáveis (ViDAS) no México, considerando requisitos mecânicos, durabilidade e sustentabilidade. A crise climática e econômica são desafios atuais para uma Indústria de Construção Circular, mas o I3DMC reduz as emissões de CO₂, materiais e resíduos, mão-de-obra, tempos e custos em até 88%, 50%, 70% e 90%, respectivamente, alcançando a resistência e durabilidade da construção convencional. Da mesma forma, existem empresas I3DMC em países desenvolvidos, mas importar esta tecnologia para países em desenvolvimento não é acessível, portanto, a investigação sobre tecnologias I3DMC está em curso em Nuevo León, México, permitindo a construção de ViDAS por 1.700-4.500 dólares/m².

Palavras-chave: economia circular; impressão 3d de materiais cimentícios; habitação digna, acessível e sustentável; projeto eficiente; propriedades mecânicas e de durabilidade.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La Economía Circular (EC) es un paradigma a nivel mundial que promueve la participación de todos los sectores de la sociedad (público, privado, académico y sociedad civil) para alcanzar una mejor calidad de vida con base en la sostenibilidad de los países. Las industrias están adoptando un modelo de producción y consumo basado en compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar los recursos existentes, con el fin de generar un valor añadido a los productos y materiales, incidiendo tanto en la manufactura y comercialización, como en su reintegración dentro de nuevos ciclos de producción y consumo (Parlamento Europeo, 2023). De esta forma, el ciclo de vida de los materiales se extiende al incorporarse una y otra vez en la manufactura de nuevos productos como materias primas circulares, lo cual reduce los residuos de las industrias al mínimo.

Si un producto llega al final de su vida útil, sus materiales se mantienen dentro de las cadenas de valor y suministro siempre que sea posible su reciclaje, reparación, renovación, etc., incluso compartiendo las materias primas circulares entre industrias de diferentes tipos, lo cual puede requerir del acondicionamiento de los materiales, su transformación, control de calidad, etc. Por lo tanto, la circularidad forma parte del diseño eficiente de los materiales para lograr la optimización de los procesos, del control de calidad y de la durabilidad de los elementos de construcción (Mendoza-Rangel y Díaz-Aguilera, 2023; Yang y col., 2022). Este modelo circular contrasta con el modelo económico lineal convencional, basado principalmente en “usar y desechar” o de obsolescencia programada, el cual requiere de grandes cantidades de materiales y energía, baratos y de fácil acceso, que asocian el consumo no-sostenible de los recursos naturales (Parlamento Europeo, 2023). Así, diversos autores a nivel mundial (Adesina (2020), Van Breugel (2017) y Villagrán-Zaccardi y col. (2022)), han aplicado los principios de la EC en la Industria de la Construcción (IC) para desarrollar materiales, tecnologías y procesos más sostenibles con respecto de la construcción convencional. Los esfuerzos de la IC en EC pueden clasificarse en siete áreas principales (Mendoza-Rangel y Díaz-Aguilera, 2023): (i) Digitalización, (ii) Innovaciones tecnológicas, (iii) Diseño eficiente, (iv) Materiales reciclados, (v) Extensión de vida útil, (vi) Recursos locales, y (vii) Procesos eficientes. Los alcances y beneficios de las siete áreas tienden a superponerse en función del modelo de EC a desarrollar para la IC, pudiendo incluir la fabricación de materiales de construcción, aditivos químicos, agregados reciclados, procesos de construcción, diseño de mezclas, optimización de propiedades (p.ej., mecánicas, durabilidad, térmicas, etc.), proyectos de edificación e infraestructura, o cualquier otro tipo de aplicación.

Con respecto a la digitalización de la IC, esta se logra introduciendo elementos tecnológicos para alcanzar la optimización de los materiales y sus propiedades, procesos de fabricación y construcción, etc. (NoParast y col., 2021), favoreciendo la sostenibilidad de la industria y la reducción de la huella de carbono. Algunos ejemplos son: (i) la reducción en la generación de desperdicios mediante el control preciso de la dosificación y mezclado de los materiales, utilizando sensores de monitoreo en tiempo real, lo cual también reduce la variabilidad de las propiedades resultantes (Adesina, 2021; NoParast y col., 2021); (ii) el control de la composición química durante la producción de materiales por medio del modelamiento estadístico avanzado, utilizando softwares (Perez-Cortes y Escalante-García, 2020); (iii) el control de calidad del diseño, materiales y procesos por medio de Inteligencia Artificial o modelado BIM (Adesina, 2021; Hossain y col., 2020; Marsh y col., 2022); (iv) la disminución de los tiempos de construcción o la fabricación de elementos prefabricados mediante el uso de robots y maquinaria automatizada, que incluso pueden operar 24 horas al día y siete días a la semana con el mismo rendimiento, como la impresión 3D (Fořt, y Černý, 2020; Robayo-Salazar y col, 2023); (v) el desarrollo de materiales y elementos de construcción circulares considerando un diseño eficiente que permita maximizar tanto la durabilidad durante la primera vida de servicio, como la circularidad para reparar el material,

reincorporarlo en nuevos ciclos de vida como materia prima en el mismo tipo de proceso, en otra nueva aplicación en la IC o incluso en otra industria; etc. (Velvizhi y col., 2020).

Entre las opciones relacionadas con la digitalización de la IC, la impresión 3D de mezclas cementantes (I3DMC) es una de las tecnologías con más ventajas en términos de desempeño mecánico, durabilidad y sostenibilidad, ya que permite crear elementos de construcción tridimensionales, arquitectónicos y estructurales, capa por capa a partir de un diseño digital, de manera precisa, eficiente, eficaz y por un costo significativamente menor en comparación con la construcción convencional (ArchDaily, 2018; Colorado y col., 2020; Şahin y col., 2022; WINSUN, 2014). La I3DMC ha atrapado la atención de CEMEX y HOLCIM, afirmando su interés por desarrollar estas tecnologías y aprovecharlas en el mercado mexicano (CEMEX, 2022; HOLCIM México, 2024). No obstante, esto se realiza en colaboración con la empresa COBOD de impresoras 3D de concreto, por lo que las innovaciones referidas son sólo para las tintas cementantes. La I3DMC requiere del desarrollo tecnológico de las tintas cementantes y las impresoras 3D con características específicas: (i) las tintas asocian propiedades que facilitan su impresión en 3D (p.ej., capacidad de extrusión, edificación y bombeo, así como el tiempo disponible para realizar la extrusión, etc.) y pueden elaborarse con base en distintos materiales además del cemento Portland (CP), como los cementos activados alcalinamente y los geopolímeros, tierra arcillosa, materiales de desecho, etc. (Be more 3D, 2024; Colorado y col., 2020). Posteriormente, la tinta cementante impresa se endurece y debe presentar propiedades mecánicas, de durabilidad y sostenibilidad que sean competitivas con respecto del concreto convencional (Colorado y col., 2020; Motalebi y col., 2023; Nohedi y col. 2022; Robayo-Salazar y col, 2023; Şahin y col., 2022). (ii) La impresora 3D requiere una estructura de soporte y sistemas de extrusión, bombeo, movimiento en tres direcciones (X, Y y Z), etc. Además, aunado a la contribución a la sostenibilidad del procedimiento constructivo, la impresora 3D debe presentar componentes que permitan un alto desempeño y durabilidad, minimizando los mantenimientos bajo las condiciones adecuadas (Jo y col., 2020; Şahin y col., 2022).

Por otra parte, la IC en México busca alternativas sostenibles para lograr una EC, como las soluciones a los problemas de vivienda, calidad y espacio, incluyendo la asequibilidad, calidad y resistencia de los materiales, pisos de tierra, vivienda provisional, durabilidad y mantenimiento, entre otros. Esto es debido a las declaraciones de ONU-Hábitat que estimó desde 2019 que el 38.4% de las viviendas en México son inadecuadas (ONU-Hábitat, 2019). Por lo tanto, la I3DMC es una propuesta de base tecnológica que podría contribuir a la construcción de vivienda digna, asequible y sostenible (ViDAS) conforme a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2015). No obstante, la investigación y desarrollo tecnológico en esta área es limitada en México (Perales-Santilla y col., 2024; Ruiz-Jaramillo, 2021), por lo cual se requiere precisar el estado del arte a nivel internacional de la I3DMC con el fin de analizar su idoneidad según el contexto nacional y brindar las directrices para brindar soluciones innovadoras que mitiguen el cambio climático mientras transforman la IC para lograr la construcción de ViDAS. Esto puede incluir el desarrollo de tecnología mexicana en torno a:

(i) tintas cementantes convencionales con base en concretos y morteros que optimicen el uso del CP; (ii) tintas cementantes de bajo carbono que sustituyen parcialmente el uso de CP por materias primas alternativas (piedra caliza, arcillas calcinadas, subproductos de la industria energética, agroindustrial, etc.); (iii) tintas de cementantes alternativos que usen 0% clinker como los cementos activados alcalinamente, geopolímeros, etc.; (iv) sistemas de construcción modular; (v) impresoras 3D de mezclas cementantes; (vi) diseño eficiente y sostenible de viviendas con base en la optimización estructural, de la durabilidad y extensión de vida útil, energética (p.ej., el uso de energías renovables como paneles solares, arquitectura bioclimática, materiales avanzados como termoaislantes, ventanas inteligentes, etc.), de recursos hídricos (filtros para reutilización de aguas grises, etc.) y otros. Asimismo, se debe resaltar la importancia de la vinculación entre los sectores

de la sociedad para promover una mayor transferencia tecnológica desde el sector científico al industrial, que transforme la investigación en PIB a largo plazo. Las alianzas estratégicas entre el sector industrial, público y científico, también permitirán que la IC ejerza un rol como agente de transformación de EC para otras empresas y la sociedad, favoreciendo la adaptación eficiente ante los retos de la sostenibilidad.

Por lo tanto, se presenta un análisis del estado del arte para la I3DMC en términos de las propiedades mecánicas, de durabilidad, sostenibilidad y costos, así como del panorama de la vivienda en México, utilizando como base las condicionantes internacionales con el fin de elucidar los requerimientos actuales para alcanzar la ViDAS. En este contexto, debido a su distinción como punta de lanza en el desarrollo de tecnológico del país, en este trabajo se presenta un análisis del Estado de Nuevo León (NL) para determinar su idoneidad para emprender el desarrollo de ViDAS mediante I3DMC en función de sus condiciones y potencial como lugar adecuado. Se espera que esta investigación contribuya a la difusión, discusión e impulso de esta tendencia internacional, con el objetivo de catalizar el posicionamiento de México como un referente para América Latina en el desarrollo de tecnologías de I3DMC con base en la EC para la generación de ViDAS, mejorando la competitividad, calidad de vida y el desarrollo sostenible de Nuevo León, México y la región. Consecuentemente, en las siguientes secciones se analizan (i) las problemáticas de la vivienda en México y el estado de NL, (ii) las condiciones que definen la vivienda digna conforme a los estándares nacionales e internacionales, comparando el estado actual de la vivienda en México, (iii) el estado del arte de la I3DMC en términos de desempeño mecánico, por durabilidad y sostenibilidad, con el fin de discutir su potencial de aplicación en México.

2. LA PROBLEMÁTICA DE LA VIVIENDA EN MÉXICO

Tanto a nivel global como en México, existe una creciente problemática de vivienda que abarca: (i) déficit de viviendas, (ii) vivienda informal, (iii) falta de acceso a financiamiento o poder adquisitivo. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México presentó un déficit de 8.2 millones de viviendas en 2021 y 60.6 millones de personas con ingreso por debajo de la línea de bienestar (PIDLB), imposibilitando su acceso a una vivienda (INEGI, 2021). Por su parte, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) reportó que en el país existen 14 millones de familias sin medios para comprar o construir una vivienda, situación que ha empeorado en las últimas tres décadas (Instituto de la Vivienda, 2021). Asimismo, ONU-Hábitat estimó en 2019 que el 38.4% de la población mexicana habita una vivienda inadecuada en términos de materiales de construcción, falta de servicios públicos (p.ej., el acceso a la red de agua potable), así como hacinamiento, lo cual es referido como carencias por calidad y espacios de vivienda (CCEV) (Tecnológico de Monterrey, 2021; ONU-Hábitat, 2019). Estas problemáticas se atribuyen al incremento constante de la población, que incluye migrantes de países centroamericanos, así como al aumento de los precios de las viviendas en conjunto con el decaimiento del poder adquisitivo (INEGI, 2023).

Al respecto, la Encuesta Nacional de Vivienda del 2020 del INEGI (INEGI, 2021) mostró que el mayor problema estructural de las viviendas son las filtraciones de agua (44.2%), grietas y cuarteaduras (40.8%), lo cual propicia un mayor consumo de energía por calefacción y refrigeración, así como problemas de salud. Además, la falta de mantenimiento induce reparaciones mayores en el futuro, causando un impacto ambiental significativo por el uso de materiales y energía. INEGI (2021) destacó que el 58.5% del total de las viviendas en México reportó la necesidad de algún procedimiento constructivo para mejoramiento o ampliación de espacios; no obstante, la mayoría de los programas nacionales de subsidio incentivan la construcción de nuevas viviendas (p.ej., el 66% de los apoyos entregados por CONEVAL fueron para la adquisición de vivienda nueva entre 2013-2018) (Tecnológico de Monterrey, 2021). Cabe mencionar que el

Gobierno de México reportó que los problemas de vivienda se concentran al sur del país, por lo que se incrementaron los subsidios en estas regiones en el plan de vivienda 2021-2024 (Gobierno de México, 2023b).

Respecto del impacto ambiental, el Programa del Medio Ambiente de la ONU (PNUMA, 2020) reportó que la construcción comercial y residencial representa el 39% de las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera, el análisis incluyó todas las actividades industriales y humanas que consumen energía a nivel global. Esto es debido a la construcción de nuevas edificaciones y la operación de las existentes (por calefacción, iluminación, etc.). Adicionalmente, la IC consume aproximadamente un 40% de los materiales pétreos (grava, arena, etc.), 25% de las maderas, 16% del agua, 40% de la energía primaria y genera el 40% de los desechos de un país (Tabla 1) (Interempresas, 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz y col., 2022).

Dentro de una edificación, se ha estimado que la construcción convencional supone entre el 40%-60% de la huella ambiental en función del tipo de estructura, pero en general, estos procesos de construcción involucran el uso de combustibles fósiles y una alta demanda energética, las cuales son las principales fuentes de CO₂, razón por la que todo el sector tiene un fuerte impacto ambiental. Asimismo, se estima que la construcción convencional de vivienda residencial emite 441-561 kg-CO₂/m², aunque esto varía según las prácticas de construcción y los materiales utilizados (Interempresas, 2020). La Comisión Nacional de Vivienda reportó que el 50% de las emisiones contaminantes pertenecen a la IC, mientras que SEMARNAT indicó que en 2021 se generaron 6.5 millones de toneladas de desechos en México, siendo el 11% provenientes de la IC. De lo anterior se concluyó que se requiere mayor impulso a la construcción sostenible de vivienda hasta reducir un 30% el consumo de recursos naturales, 35% las emisiones de CO₂, 30%-50% el consumo de energía y 50%-90% los costos asociados a los desechos, esto ante la estimación de 7'000,000 de viviendas que generarán 25'000,000 de toneladas de gases de efecto invernadero para 2050 (Tabla 1) (Senado de la República, 2021).

Tabla 1. Análisis comparativo para la estimación del impacto ambiental de la industria de la construcción y las metas para su reducción en 2050 para México (Interempresas, 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz y col., 2022; Senado de la República, 2021).

Estimación del impacto ambiental actual en México		Metas para la reducción del impacto ambiental en México para 2050	
Impacto ambiental	Porcentaje (%)	Impacto ambiental	Porcentaje (%)
Consumo* de materiales pétreos (grava, arena, etc.)	40	Reducción del consumo de recursos naturales	30
Consumo* de maderas	25	Reducción de las emisiones de CO ₂	35
Consumo* de agua	16	Reducción del consumo de energía	30-50
Consumo* de energía primaria	40	Reducción de los costos asociados con los desechos	50-90
Generación* de desechos industriales	40		

*Consumo o generación en relación con el total disponible en el país.

Por otra parte, desde 2012 (Lozano y col., 2022) se tiene reporte de 20'000,000 de mexicanos que habitan en vivienda de interés social con características medias-bajas de sostenibilidad, ya que cumplen apenas con los estándares mínimos establecidos en la normatividad nacional, con un alto gasto en vivienda y transporte (mayor al 40% del ingreso), una pobre integración social, e impactos

ambientales por manejo de aguas residuales y huella de carbono. Aunado a esto, las desarrolladoras de vivienda actualmente optan por desarrollar modelos medio, residencial y plus, disminuyendo el parque de viviendas de interés social más del 50% entre 2017 y 2022, sin que se espere la mitigación de esta problemática en el corto plazo, lo cual incrementa el costo de la vivienda comercialmente disponible (El Economista, 2022a).

En cuanto a las soluciones a estas problemáticas, la Arq. Tatiana Bilbao presentó en Bienal de Arquitectura de Chicago en 2015, proyectos de vivienda familiar flexible de 43 m² que se pueden construir por \$8,000-\$14,000 dólares, algunos detalles de la construcción son: (i) el núcleo de esta vivienda se construye con block de concreto y módulos circundantes de madera más ligeros y baratos, permitiendo futuras expansiones; (ii) en su primera fase, es diseñada para tener 2 dormitorios, 1 baño y 1 sala/comedor con 5 m de altura, con la capacidad de expandirse a 5 dormitorios en su última fase; (iii) incluye ecotecnologías para maximizar la eficiencia energética (ArchDaily, 2015; Instituto de la Vivienda, 2021). No obstante, la estrategia apuesta por materiales baratos como la madera que requieren un mantenimiento significativo, siendo menos durables que el block, el ladrillo o el concreto.

Por otro lado, existen organismos federales que ofrecen apoyos económicos (Instituto de la Vivienda, 2021): CONAVI, Fondo Nacional de Habitaciones Populares (FONHAPO, subsidia a PIDLB no-derechohabientes, p.ej.: con \$40,000-53,000 para construir o adquirir vivienda, \$15,000-20,000 para ampliarla o \$10,000-15,000 para mejorarla), Fondo de Vivienda del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (FOVISSSTE, subsidia a trabajadores del ISSSTE), la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF, otorga créditos hipotecarios a no-derechohabientes a través de sociedades financieras) y programas de mejoramiento urbano (buscan mejorar las condiciones de vida de comunidades y colonias de escasos recursos y altas tasas de marginación y violencia, rehabilitando espacios públicos y viviendas que tienen posesión, pero no certeza jurídica del suelo que ocupan, regularizando la vivienda para que soliciten otros apoyos y servicios públicos). Cabe señalar que, a pesar de los esfuerzos antes mencionados, la asequibilidad de la vivienda en el país disminuyó 6.8% según el reporte del Estado Actual de la Vivienda en México de la SHF, por lo que un balance de las estrategias y resultados indicó que los programas de subsidio han sido una respuesta favorable, pero no garantizan el derecho a la vivienda adecuada al sujetarse a un crédito hipotecario (Tecnológico de Monterrey, 2021).

Todo lo anterior enmarca el panorama general de los problemas de vivienda en México y muestra la necesidad de promover nuevas estrategias más sostenibles que proporcionen a la población una ViDAS ante el contexto actual, especialmente para las PIDLB, aunque sin perder de vista que el sector de la vivienda es una de las principales actividades económicas del país, aportando más de un billón de pesos sólo en 2021 (5.7% del PIB). Además, la construcción de vivienda generó 2'366,767 de puestos de trabajo (5.8% del total nacional) (INEGI, 2023). Por lo tanto, construir ViDAS debe sostener el papel preponderante de la IC en el desarrollo económico del país.

2.1. La vivienda en Nuevo León

En el estado de NL, INEGI indicó que el total de las viviendas habitadas en 2020 fue de 2'037,261 (4.7% del total nacional), de las cuales 286,185 (14.05% del total) estuvieron deshabitadas y 95,820 (0.05% del total) fueron de uso temporal (INEGI, 2020; Instituto de la Vivienda, 2021). En términos de rezago habitacional, 71,958 viviendas presentaron condiciones de hacinamiento y otros aspectos que afectan la calidad de vida de los ocupantes, tales como el deterioro de los materiales, la construcción con materiales precarios (cartón, palma, paja, etc.), piso de tierra, falta de sanitarios o electricidad, etc. De hecho, se registraron: 398,158 viviendas con un dormitorio (19.54% del total, mayormente en Monterrey, Guadalupe y Apodaca), 13,939 con piso de tierra (concentradas en Monterrey, Juárez y General Escobedo) y 41,011 en hacinamiento (principalmente en García,

General Escobedo y Juárez) (Instituto de la Vivienda, 2021). Todo lo anterior se resumen en la Tabla 2.

En términos de población, en 2022 se registraron 5'748,442 de habitantes, de los cuales el 92% habitaron en los 18 municipios de la zona metropolitana, siendo esto un factor crucial para el aumento de demanda de viviendas. NL se ubicó en el 7° lugar nacional por el número de habitantes, pero con respecto de la composición de la población y los hogares, ocupó el 1° lugar en la recepción de migrantes mexicanos y extranjeros (113,541 personas registradas en 2020), que buscaron mejores oportunidades laborales. Además, el 50.4% de la población es económicamente activa con un salario promedio mensual de \$8,980 (Gobierno de México, 2023a; Instituto de la Vivienda, 2021), asociando un número importante de PIDLB sin un ingreso suficiente para disponer de la canasta básica alimentaria y gastos adecuados de salud, vestido, transporte, educación o vivienda; así mismo existen personas en condiciones similares que requieren mejorar su vivienda por CCEV como pisos de tierra, muros y techos de mala calidad, hacinamiento, etc. El informe de pobreza de CONEVAL en 2020 mostró que 1'123,100 de habitantes (21.1% de la población) son PIDLB en NL, los cuales no tienen capacidad para acceder a una vivienda digna bajo las condiciones actuales del mercado. Esto se traduce en 330,323 viviendas considerando el promedio de 3.4 personas/hogar de acuerdo con el INEGI (2020). Además, existen 162,700 personas (3.1% de la población) o 47,853 viviendas con CCEV, que requieren apoyo urgente para mantenimiento o ampliación; esto también se relaciona con sus ingresos limitados, llevando a los habitantes a anteponer la satisfacción de otras necesidades básicas de supervivencia (INEGI, 2020).

Tabla 2. Estado de la vivienda en Nuevo León según INEGI (2020).

Condición de la vivienda	Cantidad de viviendas
Viviendas habitadas	2'037,261
Viviendas deshabitadas	286,185
Viviendas de uso temporal	95,820
Viviendas con problemas de calidad y espacio como deterioro en los materiales, uso de materiales precarios, pisos de tierra, falta de sanitarios y electricidad, hacinamiento, etc.	71,958
Vivienda con un solo dormitorio	398,158
Viviendas con hacinamiento	41,011

Respecto del impacto ambiental, INEGI posicionó a NL como uno de los seis estados que generan la mitad de los desechos del país (4.4% del total) (Milenio, 2018), mientras que la Secretaría de Desarrollo Sustentable (2020) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) informó que las actividades de construcción contribuyen con el 10.77% de las emisiones de PM10 en el estado. Asimismo, la Facultad de Arquitectura de la UANL reportó que la construcción de vivienda sostenible puede influir positivamente en los costos de construcción en serie, mostrando un ahorro de consumo energético y de agua del 36% y 30% (Paz-Pérez, 2016). Por otro lado, resaltó que la cantidad de viviendas de NL sin habitar y sin mantenimiento agravan el impacto ambiental, ya que: (i) implican la explotación de recursos que actualmente no cubren ninguna necesidad, (ii) la degradación prematura y/o continua de las viviendas disminuye su vida útil, (iii) lo que lleva a la necesidad de construir nuevas viviendas, (iv) así como a la demolición y generación de desechos en el futuro, (v) gastos innecesarios por mantenimientos correctivos que superan los preventivos, etc. Además, llama la atención que la suma de las viviendas deshabitadas y en uso temporal se equiparó a las requeridas para las PIDLB y con CCEV registradas en NL, lo cual sugiere la necesidad de buscar nuevas soluciones para (i) lograr la asequibilidad de una vivienda digna para

el sector de la población más vulnerable y (ii) mejorar las condiciones para la población menos vulnerable.

En cuanto a las estrategias estatales y los resultados obtenidos tenemos que: la Cámara Nacional de Desarrollo y Promoción de Vivienda (CANADEVI) indicó en 2022 que el 35% de las familias no tiene acceso a una vivienda digna, advirtiendo además un rezago del 35% en la colocación de viviendas, lo cual se asoció con factores como la guerra en Ucrania, la variación de las tasas de interés, el alza en los insumos para la construcción y el impuesto verde (El Economista, 2022b). Asimismo, CANADEVI reportó que la meta en el 2022 fue colocar 40,000-42,000 viviendas, mientras que la demanda de créditos fue de 62,000, esto en contraste con la colocación promedio anual de 65,000 viviendas que se presentaba en los años previos a la pandemia por COVID-19. Por lo tanto, hubo un déficit de 16,000 viviendas, destacando que se requerirán cerca de 20,000 el próximo año, pero sólo se garantizaron 4,000. Adicionalmente, la llegada de la empresa Tesla al municipio de Santa Catarina demandará 13,000 viviendas para 35,000 empleados y sus familias, según la dirección del Instituto de Vivienda de NL (IVNL). Por su parte, el INFONAVIT en NL comunicó en abril de 2023 acomodará 46,000 créditos de vivienda (2,000 más que en 2022), contando con el alta de 30,000 en el Registro Único de Vivienda en ese momento (El Economista, 2023).

Se reportó que las personas adquieren los créditos, pero sus ingresos no les permiten pagarlos y, aunque en el sector bancario existen recursos disponibles, hay poca solicitud de préstamos debido a que el producto es muy caro. De hecho, NL es el segundo estado con mayor demanda de vivienda, solo después de Ciudad de México (CDMX), presentando un costo promedio de vivienda de \$4'017,532, el cual está por encima del resto del país con excepción de CDMX con \$8'057,000 (Instituto de la Vivienda, 2021; Tecnológico de Monterrey, 2021). Según CANADEVI, el 33% de la vivienda demandada supera los \$300,000 y el 35% alcanza los \$800,000. De hecho, el alza en los precios de la vivienda también golpea gravemente a los jóvenes que inician su vida laboral, ya que no pueden acceder a una vivienda digna, teniendo que rentar sin la posibilidad de adquirir un patrimonio hasta una edad madura (en el mejor de los casos), con una deuda de por vida o sólo consiguiendo una vivienda en la periferia de la zona urbana que implica traslados largos y costosos, con un enorme impacto en su calidad de vida que agravan más la brecha económica en México.

Así, INFONAVIT promovió tasas de interés entre 3.5%-5% para 131,000 trabajadores de ingresos bajos (El Economista, 2023), con un límite de préstamo de \$2'407,347 para comprar una vivienda nueva o existente (el monto del préstamo otorgado dependió de la capacidad de pago, salario y edad del solicitante) (Expansion, 2023). Por otro lado, el Gobierno de NL propuso a los no-derechahabientes un programa de subsidios mediante el FOMERREY, para adquirir una vivienda suficiente, asequible y adecuada. Además, redujo el impuesto verde por extracción de recursos pétreos de 1.5 a 0.8, fomentando una disminución en los precios de los materiales de construcción, mientras que los gobiernos municipales incentivarán la exención de impuestos sobre adquisición de inmuebles (ISAI). Asimismo, se solicitó al INFONAVIT la realización estratégica de nuevos fraccionamientos (CentroUrbano, 2023), por lo que la CANADEVI promocionó los beneficios de la verticalización de la vivienda, ya que 150 personas contenidas en 25 hectáreas de terreno pueden contar con todos los servicios en el mismo lugar (El Economista, 2022b).

3. LA VIVIENDA DIGNA Y SUS CONTRASTES EN MÉXICO

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (art. 4º) indica que toda familia tiene derecho a disfrutar de una vivienda digna y decorosa, lo cual significa que el Estado tiene la obligación de respetar, proteger y desarrollar acciones que permitan a las personas disponer de una vivienda adecuada y su adquisición no debe ser excesiva, comprometiendo la satisfacción de otras necesidades (Tecnológico de Monterrey, 2021). Asimismo, la ONU declaró la vivienda como un

derecho humano, económico, social y cultural, debiendo ser adecuada en: seguridad de tenencia, disponibilidad de servicios, habitabilidad, accesibilidad, ubicación, adecuación cultural y asequibilidad. Resaltó que su costo debe ser accesible para todas las personas sin poner en peligro el disfrute de otras necesidades básicas y derechos humanos, por lo que una vivienda es asequible si los gastos asociados requieren menos del 30% del ingreso de una persona (ONU-Hábitat, 2019). Lastimosamente, existe una brecha importante entre estos requerimientos y la realidad en México. Los tipos de vivienda en México son (Tecnológico de Monterrey, 2021): (i) Vivienda formal, desarrollada por particulares privados en suelo urbano habitable; su característica esencial es la tenencia de la tierra, es construida con licencias y permisos, cumple con niveles de habitabilidad (espacio, seguridad estructural, iluminación, ventilación, reglamentos de construcción, servicios urbanos básicos de agua, drenaje, electricidad, vialidad y acceso a equipamiento urbano, educación, salud, comercio, recreación y trabajo). (ii) Vivienda informal, desarrollada por las familias mediante autoconstrucción y autogestión en suelo no urbanizable (de preservación ecológica, riesgo natural o socio organizativo), sin seguridad en la tenencia de la tierra, no cumple los requerimientos de habitabilidad. (iii) Vivienda rural, edificada en un entorno rural de producción agropecuaria, sobre suelo ejidal comunal con población < 10,000 habitantes, existe seguridad de tenencia de la tierra, con niveles de habitabilidad mínimos (seguridad estructural, iluminación, ventilación, puede carecer de servicios sanitarios y de energía). (iv) Vivienda rural indígena, desarrollada por las familias mediante autogestión y autoconstrucción comunitaria en suelo rural indígena ejidal comunal, de población < 10,000 habitantes con características étnicas de usos y costumbres, cumpliendo con niveles de habitabilidad tradicionales, sin servicios básicos ni equipamiento urbano.

Por otra parte, el IVNL (2021) señala que las causas a los problemas de la vivienda en NL son: (i) Los bajos ingresos, asociando incapacidad para ahorrar y realizar mantenimientos a las viviendas, llevando a un estado precario y sin acceso a alguna solución. (ii) La vivienda provisional (asentamientos irregulares), son personas con pobreza sin acceso al mercado formal de vivienda; ilegalmente acceden a un suelo barato y autoconstruyen con materiales percederos y poco resistentes, en zonas riesgosas de difícil acceso a servicios básicos, promoviendo problemas de salud y condiciones inseguras ante desastres naturales, etc. (iii) Procesos de autoconstrucción insuficiente por la falta de soluciones habitacionales inmediatas para la subsistencia, falta de conocimientos o de una supervisión adecuadas. La obra avanza conforme la disponibilidad de recursos y, por la falta de capacitación para construir, asocia problemas de salud por uso de materiales, distribución deficiente de espacios, cocinas en dormitorios, falta de sanitarios, desperdicio de materiales, etc. Esto acentúa los impactos ambientales. (iv) Bajo nivel educativo-cultural, complicando la inserción exitosa en el mercado laboral y la movilidad social. El promedio de escolaridad en NL es de 10.7 años, pero resalta que el acceso a una educación no asegura el aprendizaje de calidad, limitando las oportunidades del individuo.

Asimismo, según el IVNL (2021) los efectos de los problemas de la vivienda son: (i) El deterioro de la vivienda por falta de mantenimiento, agravando los daños persistentes (estructurales, humedad, pisos de tierra, grietas en paredes o falta de puertas y ventanas), lo cual afecta la calidad de vida. (ii) Mayor vulnerabilidad ante desastres naturales; las viviendas provisionales tienen una alta probabilidad de afectarse, destruirse, sufrir accidentes o problemas de integridad. (iii) Viviendas con riesgo estructural, sin servicios ni espacios de calidad. Es un efecto de la autoconstrucción y el asentamiento en terrenos apartados o irregulares sin preparación para su conexión a la red pública de agua, drenaje o electricidad, haciendo complicada, peligrosa o ilegal su provisión. Además, las viviendas irregulares o descuidadas corren el riesgo constante de sufrir daños estructurales en cualquier momento, ofreciendo una deficiente protección del exterior.

Todo lo anterior señala la necesidad de implementar un nuevo enfoque para dar solución a los problemas de la vivienda en México, con el objetivo de alcanzar ViDAS. Por lo tanto, en la

siguiente sección se discute el estado del arte de la I3DMC en términos de EC y la idoneidad para lograr su aplicación en la IC de México, lo cual incluye el análisis de las condiciones para el Estado de Nuevo León como primer escenario.

4. LA IMPRESIÓN 3D DE MEZCLAS CEMENTANTES Y SU POTENCIAL DE APLICACIÓN EN MÉXICO

Para comprender las ventajas de la I3DMC, se debe señalar que en Latinoamérica y México predominan los métodos convencionales de construcción informal y la autoconstrucción como el concreto hecho en obra, resultando en viviendas sobrediseñadas, de baja calidad, el uso intensivo de recursos, la alta generación de desperdicio de materiales, los procedimientos precarios, el almacenamiento inadecuado, la mala planeación y otras características típicas de los países en desarrollo (Villagrán-Zaccardi y col., 2022). Por lo tanto, mitigar la autoconstrucción es uno de los grandes retos de la IC latinoamericana para alcanzar las metas de sostenibilidad, lo cual involucra estrategias como sustituir el uso del cemento empaquetado por (Mendoza-Rangel y col., 2023, Villagrán-Zaccardi y col., 2022): (i) Cemento y mortero empaquetado de baja huella de carbono y contenido de clinker (fase del cemento que asocia el mayor impacto ambiental en la producción del CP). (ii) Concreto y mortero pomezclado, así como estructuras de concreto prefabricadas, las cuales permiten optimizar las propiedades y cantidades de material. No obstante, asocia un impacto ambiental por el uso de CP y el transporte al sitio de la obra. (iii) La I3DMC, la cual integra la digitalización y automatización en el proceso constructivo mediante una impresora robótica multifuncional operada a partir de un diseño modelado en 3D.

Resalta que la I3DMC ofrece ventajas únicas (OSHA, 2022; Robayo-Salazar y col., 2022; Villagrán-Zaccardi y col., 2022): (i) Un potencial ilimitado para la construcción y verticalización eficiente de viviendas, apartamentos, puentes y cuarteles en zonas de guerra activa. (ii) Los diseños tienen opciones ilimitadas de creatividad, originalidad y complejidad, debido a la libertad del diseño simétrico y asimétrico. Esto permite la optimización estructural o arquitectónica, reduciendo la brecha entre la ingeniería y el diseño, integrando la arquitectura bioclimática, ecotecnologías, materiales inteligentes, etc. Las anteriores son ventajas relacionadas con la precisión y control de este proceso constructivo. (iii) La IC es el 9° espacio profesional más peligroso en EUA con el 21% del total de muertes anuales (OSHA, 2022). La I3DMC reduce la demanda de mano de obra convencional, requiriendo poco personal especializado. Esto también evita problemas por autoconstrucción y falta supervisión adecuada. (iv) La I3DMC minimiza el uso de cimbra, ya que la colocación de capas sobre capas de las mezclas cementantes de curado rápido permiten autosostenerse, mitigando el uso de madera, aluminio o acero. (v) Permite el diseño de tintas de cementos, morteros y concretos de baja huella de carbono, así como su elaboración por especificación, ya que integra un sistema de mezclado similar al concreto pomezclado o prefabricado. Asimismo, las tintas pueden elaborarse con desechos industriales y materiales regionales para sustituir el CP (p.ej., por escorias, cenizas volantes, cenizas de bagazo de caña, arcilla calcinada, piedra caliza, cementos activados alcalinamente, etc.), dependiendo de las propiedades deseadas (p.ej., aislamiento térmico, acústico, resistencia mecánica, durabilidad, etc.). Cabe mencionar que están en desarrollo mezclas cementantes con potencial de captación del CO₂ ambiental, las cuales podrían ser una opción interesante en el futuro de la impresión 3D (Kaliyavaradhan y col., 2020). (vi) La I3DMC simplifica la planeación de obra y elimina el impacto ambiental por el transporte asociado con el suministro de concreto pomezclado o prefabricados.

En este contexto, se deben resaltar los avances alcanzados por las empresas de I3DMC a nivel mundial. Por ejemplo, la empresa china Winsun presentó los siguientes desempeños en comparación con la construcción convencional (WINSUN, 2014; ArchDaily, 2014): (i) La construcción de 10 casas en 24 h y un edificio de oficinas en Dubai, reduciendo un 30% el tiempo

de construcción. (ii) El ahorro en costos de construcción y mano de obra del 80%. (iii) La reducción del 30% al 60% de los desechos en función del tamaño de los elementos impresos. (iv) El 50% del concreto utilizado procedió de desechos de la construcción. Por su parte, siendo pioneros en el mundo, el gobierno de los Emiratos Árabes Unidos y Dubai manifestaron en su 3D Printing Strategy en 2015 que el 25% de sus edificios serán impresos para 2025, reduciendo un 70% la mano de obra y 90% los costos, mientras que el tiempo de construcción es el 10% del empleado en la construcción convencional, según la Dubai Future Foundation. La iniciativa incluye la impresión de productos de iluminación, cimentaciones, juntas de construcción, instalaciones, parques, edificios humanitarios y vivienda móvil (ArchDaily, 2018). Asimismo, respecto de la construcción modular con I3DMC, en 2021 en Países Bajos se entregó la primera vivienda de 94 m² compuesta por 24 elementos impresos en fábrica y transportados al sitio de construcción, integrando techos y muros inclinados en un diseño de arquitectura bioclimática con aislamiento térmico y conexión a red de calefacción, logrando un coeficiente de rendimiento energético de 0.25 de una vivienda altamente confortable y energéticamente eficiente (ArchDaily, 2021a). Cabe mencionar que las propiedades de confort térmico y acústico se pueden esperar en la I3DMC, debido a la personalización del diseño y la adaptación de las condiciones del entorno, el uso de materiales o sistemas aislantes eficientes, así como la precisión y consistencia de la técnica. De hecho, García-Alvarado y col. (2020) reportaron que la IC en Chile está interesada en la I3DMC por las envolventes con altas capacidades térmicas y sismorresistentes en vivienda asequible. La primera, debido al sistema de extrusión en dos muros paralelos con un vacío interno; mientras que la segunda requiere de un diseño especializado. En cuanto a la construcción en zonas marginadas, existe reporte de la empresa estadounidense ICON y la organización New Story que en 2019 imprimieron dos casas para familias de PIDLB en Tabasco. En este caso, se logró que la tinta de concreto aprovechara los recursos locales, obteniendo un aspecto texturizado y blanquecino de la impresión 3D (ArchDaily, 2021b).

Las ventajas que ofrece la I3DMC y los avances que presenta esta industria, se relacionaron con las propiedades físicas, mecánicas, de durabilidad y sostenibilidad que se pueden alcanzar con los elementos impresos en 3D. Por ejemplo, en comparación con el concreto convencional, se ha logrado que la I3DMC alcance un desempeño mecánico y de durabilidad cuasi-isotrópico similar o superior por medio del uso de aditivos y mezclas de alto desempeño, funcionando como monolitos y evitando los puntos débiles en las uniones entre capas (CEMEX, 2022; Ma y col., 2019; MARQ, 2021; Murcia y col., 2020; Ye y col., 2021). La Tabla 3 muestra algunos ejemplos comparativos para las propiedades mecánicas. Se debe resaltar que a nivel industrial se ha alcanzado una resistencia similar entre los elementos impresos en 3D y los elaborados en la construcción convencional, pero las empresas deben desarrollar sus propias tintas utilizando los materiales cementantes, agregados y aditivos químicos regionales, considerando las condiciones ambientales ya que actualmente no existen estándares internacionales que regulen su manufactura y, por lo tanto, la evaluación del desempeño de los elementos I3DMC se ha realizado con base en empatar las propiedades estandarizadas para el concreto convencional o desarrollando normativas locales (Be more 3D, 2024). Aunado al desarrollo de normativa, otro reto importante en el desarrollo de la I3DMC es la incorporación de diferentes tipos de materiales (p.ej., desechos industriales, geopolímeros, tierras y arcillas, etc.) para elaborar las tintas cementes que logren simultáneamente las propiedades reológicas óptimas para su impresión en 3D y el desempeño mecánicas en estado endurecido (Ahmed, 2023; Song y Li, 2021).

Tabla 3. Comparación de propiedades mecánicas para concreto convencional e impreso en 3D.

Propiedad	Material constructivo	
	Concreto convencional	Concreto impreso en 3D
Porosidad (Rahul y col., 2019)	9-11%	7%, el mejoramiento se debió a una mayor compactación y empaquetamiento debido al proceso de extrusión. 11% en las interfaces debido a las irregularidades del filamento.
Fuerza de unión por cortante directo (Rahul y col., 2019; Ye y col., 2021)	7-8 MPa.	Disminuyó de 22-29% en las capas verticales y 24% en las horizontales, lo cual se asoció al tiempo de deposición entre capas.
Resistencia de compresión (Baz y col., 2020; Liu y col., 2021; Özalp y Yilmaz, 2020; Rahul y col., 2019; Ye y col., 2021)	38-75 MPa.	Disminuyó de 13-21% en las tres direcciones debido a la porosidad en las interfaces de las capas; los resultados son similares en ensayos Pull Out. Pero aumentó 3-18% al reforzar con fibra u optimizar los parámetros de impresión.
Resistencia de flexión (Arunothayan y col., 2020; Joh y col., 2020; Rahul y col., 2019; Ye y col., 2021)	8.5-15.1 MPa.	Disminuyó de 33-40% en dirección paralela a la unión de capas, pero aumentó de 18-19% en dirección perpendicular; lo anterior se asoció con la porosidad. Reforzar con fibra da resultados similares.
Resistencia de tensión (Wolfs y col., 2019)	~4 MPa.	Reducción de ~10% indistintamente de la dirección. A mayor tiempo de deposición entre capas, menor la resistencia.

Con respecto de la durabilidad de las tintas y las impresoras 3D, ambos presentan un mantenimiento mínimo a largo plazo si (Jo y col., 2020; Nohedi y col., 2022): (i) la tinta es optimizada para lograr la menor cantidad de juntas y uniones, reduciendo las filtraciones de agua o aire; (ii) la impresora 3D recibe limpieza continua para evitar el endurecimiento de las tintas en los sistemas de extrusión y bombeo. Específicamente, los elementos I3DMC ha mostrado resultados de durabilidad variables con respecto de la construcción convencional (Tabla 4), lo cual radica en la optimización del diseño de la mezcla y los parámetros de impresión para lograr la densificación necesaria en el elemento impreso en 3D, impidiendo la penetración de cloruros, sulfatos y otros agentes de deterioro (Natives3D, 2018; Nohedi y col., 2022; Rehman y col., 2021; Xiao y col., 2021).

Por lo tanto, optimizar el proceso de extrusión es clave porque modifica la morfología de los poros y la compacidad del elemento impreso en 3D para limitar el ingreso de los agentes agresivos (El Inaty y col., 2022). Por otra parte, la precisión y consistencia de la I3DMC contribuyen al control de calidad, disminuyendo la variabilidad de las propiedades de durabilidad. No obstante, también es posible el uso de materiales avanzados para disminuir los problemas estructurales o de durabilidad, p.ej., en caso de requerirse un refuerzo en el elemento impreso en 3D, es posible introducir varillas, alambre o fibras de acero, basalto, polipropileno, etc. (Ding y col., 2020; El Inaty y col., 2022; Robayo-Salazar y col., 2023; Sikora y col., 2022; Song y Li, 2021; Zhang y col., 2021). Cabe mencionar que la investigación de elementos impresos en 3D para diferentes condiciones de exposición y agentes agresivos sigue en curso, lo cual debe adaptarse a las regiones del país, evaluándose por largos periodos de tiempo y buscando la optimización de las propiedades de durabilidad usando materiales locales (Mendoza-Rangel y Díaz-Aguilera, 2023; Song y Li, 2021).

Tabla 4. Comparación de la durabilidad para concreto convencional e impreso 3D.

Propiedad o exposición	Material constructivo	
	Concreto convencional	Concreto impreso en 3D
Cloruros (Van Der Putten y col., 2020)	Área de ingreso y penetración de cloruros de 7-35 días fue de 10-15% y 18-20%, respectivamente.	Área de ingreso y penetración de cloruros de 7-35 días fue de 30-48% y 30-50%, respectivamente. Un mayor tiempo de impresión aumentó la porosidad y el ingreso del cloruro.
Tiempo para la contracción por evaporación de agua (Mohelich y col., 2020)	3-6 hrs.	1.2-2 hrs, la disminución se asoció con una mayor porosidad en la interfaz de las capas.
Altas temperaturas (240°C) (Cicione y col., 2021)	Contenido de aire de 6%. Resistencia de flexión y compresión de 6 y 58 MPa, respectivamente.	Contenido de aire de 5.1%. Resistencia de flexión y compresión de 5 y 68 MPa, respectivamente. El mejoramiento se asoció a una mayor porosidad que mitigó el desprendimiento por acción de las presiones hidrotérmicas internas.
Ácido sulfúrico (El Inaty y col., 2022)	Pérdida de masa del 1% (84 días) y 3.5% (140 días). La resistencia de compresión y flexión disminuyeron de 69 a 44 MPa (36%) y de 13 a 11 MPa (15%), respectivamente.	Pérdida de masa del 0.8% (84 días) y 4% (140 días). La resistencia de compresión y flexión disminuyeron de 30 a 27 MPa (10%) y de 12 a 11 MPa (8%). El mejor desempeño se asoció con una menor porosidad.

Con respecto del impacto ambiental y la sostenibilidad de los elementos de I3DMC en comparación con el concreto convencional (Figura 1), se reportaron reducciones en (i) las emisiones de CO₂ del 12%-88%, (ii) el impacto ambiental asociado con la arena y acero del 20%-50%, (iii) el consumo energético del 86-87%, (iv) la energía incorporada del 12%-55%, (v) el potencial de calentamiento global del 55%-77%, (vi) la toxicidad del ambiente de 4%-53%; así como (vii) un aumento en la productividad del 47-48.1% (Motalebi y col., 2023). Otros aspectos de sostenibilidad se comparan en la Tabla 5. Es interesante mencionar que estos resultados estuvieron asociados al uso del cemento Portland ordinario (CPO), y podrían mejorarse interesantemente utilizando tintas de cementantes alternativas desarrolladas para su impresión 3D en Nuevo León, México como los activados alcalinamente de metacaolín (MC) con altas cantidades de piedra caliza pulverizada (PC) (hasta 80%), los cuales se desarrollaron considerando criterios de Diseño Eficiente de EC tales como utilizar MC de media-alta pureza, optimizar la ruta de transformación del caolín-metacaolín que minimizó el tiempo de calcinación, desarrollando metodologías de diseño y optimización de la composición química para maximizar las propiedades mecánicas, de durabilidad y sostenibilidad, etc. (Díaz-Aguilera, 2024). Recientemente, estos cementantes fueron validados para utilizarse en impresión 3D logrando resultados satisfactorios sin la necesidad de utilizar aditivos químicos (Perales-Santillan y col., 2024).

Los resultados preliminares mostraron que solamente la tinta cementante presentó una reducción del 77.5% en las emisiones de CO₂ asociadas con el proceso de fabricación en relación con el CPO (Díaz-Aguilera, 2024), lo cual debe añadirse a la contribución del proceso constructivo por impresión 3D. Cabe mencionar que esta mezcla optimizada con 80%PC superó por 228.5 unidades

de diseño eficiente (ude) al CPO, según un indicador de EC propuesto que consideró el desempeño mecánico, por durabilidad y sostenibilidad; mientras que una mezcla optimizada con 30%PC lo superó por 1147.2 ude (Díaz-Aguilera, 2024). Además, otro estudio de estos cementantes optimizados usando MC de alta pureza, mostró una reducción del 42.6% en el costo de producción con respecto de un cemento Portland compuesto (CPC) (Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020). El anterior es un ejemplo de las tintas cementantes en desarrollo en Nuevo León, México (UANL-FIC, 2023), el cual sugiere que las tecnologías de I3DMC pueden ser aún más eficientes en combinación con otros desarrollos mexicanos.

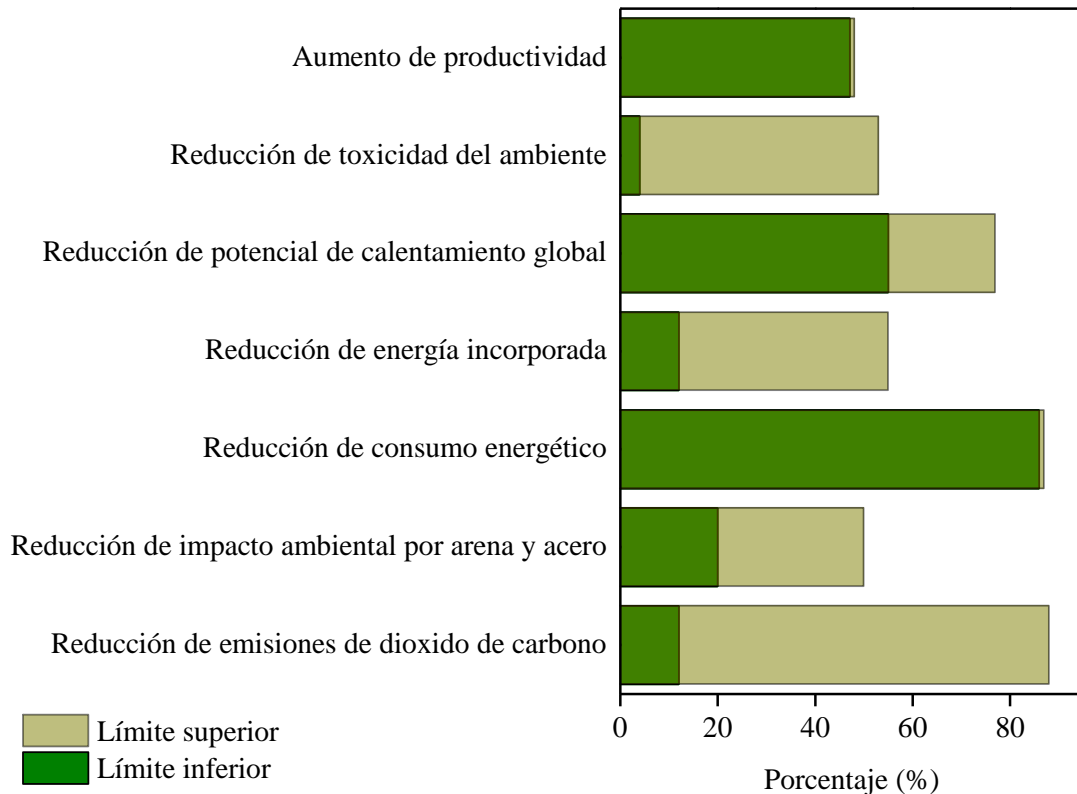


Figura 1. Ventajas en los aspectos del impacto ambiental de la impresión 3D de materiales cementantes con respecto del concreto convencional (adaptado de Motalebi y col., 2023).

Asimismo, se deben considerar el impacto sobre la economía y las condiciones laborales al analizar la sostenibilidad de la I3DMC. Inicialmente, no se esperaba una masificación en el uso de la I3DMC en México, lo cual disminuiría drásticamente la contratación de personal de la construcción. Esto es considerado como una desventaja de la I3DMC, aunque también sugiere la necesidad de una actualización en la IC mediante capacitación especializada del personal (Amhed, 2023; De Schutter y col., 2018). No obstante, las múltiples ventajas de la I3DMC la colocan como una de las tecnologías más sostenibles y rentables por explotar, tal como lo confirma el crecimiento exponencial de la inversión en esta tecnología que se experimenta actualmente, lo cual se refleja en el número de empresas que ya operan en países desarrollados como EUA, China, Emiratos Árabes, Canadá, Japón y España (ArchDaily, 2018; Be more 3D, 2024; Motalebi y col., 2023; Winsun, 2014). De hecho, la empresa CEMEX (2022) en colaboración con la empresa internacional de impresoras COBOD, anunció en septiembre de 2023 la introducción de la primera impresora 3D de concreto en México con el fin de innovar en el desarrollo de tintas elaboradas de concreto, lo cual muestra el interés de introducir la tecnología de I3DMC en el mercado mexicano. Cabe mencionar que adquirir y poner en operación una impresora de COBOD (2023) ronda los \$400,000-\$1'000,000 de dólares, volviéndola de acceso relativamente difícil en países en

desarrollo. Todo lo anterior significa que la tecnología de I3DMC se está investigando intensamente a nivel mundial con el fin de introducirla progresivamente en los mercados y la clave está en el desarrollo de impresoras 3D funcionales, robustas y durables, así como de tintas cementantes con la capacidad de ser impresa, resistencia mecánica, durabilidad y bajo impacto ambiental (Robayo-Salazar y col., 2023).

Tabla 5. Comparación en aspectos de sostenibilidad para concreto convencional e impreso 3D.

Aspecto de sostenibilidad	Material constructivo	
	Mampostería y concreto convencional (colado en sitio)	Concreto impreso en 3D
Reducción de desperdicio de material (Buswell y col., 2007; Nematollahi y col., 2017; Sanjayan y col. 2019)	Puede generar más desperdicios en proyectos que requieren correcciones por cortes o errores humanos.	Permite una reducción significativa del desperdicio debido a la precisión por la automatización del proceso, minimizando cortes.
Uso de materiales sostenibles (Ding y col., 2020; Li y col., 2024; Xiao y col., 2021)	Normalmente usa materiales convencionales de mayor impacto ambiental debido a la extracción de materias primas y el proceso de fabricación. Depende en gran medida de los materiales disponibles localmente, que pueden no ser sostenibles.	Puede utilizar materiales de construcción más sostenibles debido al diseño de las tintas cementantes, (p.ej., concreto reforzado con fibras naturales, materiales reciclados, etc.).
Eficiencia energética (Abdalla y col., 2021; Alkhalidi y col., 2020; He y col., 2020)	Requiere medidas adicionales para mejorar la eficiencia energética, como la instalación de aislamiento después de la construcción. Las juntas de construcción pueden representar puntos de fuga de energía si no se sellan correctamente.	La capacidad de integrar aislamiento térmico y otras características mejora la eficiencia energética de la vivienda. La reducción de las juntas de construcción puede disminuir los puntos de fuga de energía.
Durabilidad y mantenimiento (Ahmed y col., 2023; de Souza y col., 2024; Schuldt y col., 2021)	La durabilidad depende de la calidad del concreto asociada con la mano de obra. Puede requerir mantenimiento regular para reparar grietas y evitar el deterioro.	Puede ser más duradero y requerir menos mantenimiento a largo plazo debido a la uniformidad y resistencia del material. Menor riesgo de deterioro por corrosión debido al uso de materiales no metálicos.
Huella de carbono (De Schutter y col., 2018; Khan y col., 2021; Mohan y col., 2022)	Puede ser mayor debido a la cantidad de energía requerida para la fabricación del concreto y el transporte de materiales. Requiere de equipos de alto consumo de combustibles fósiles.	Puede ser menor en comparación con la construcción convencional debido a la reducción de la energía, desechos y materiales.

Otro aspecto de interés relacionado con la sostenibilidad de la I3DMC es el costo de la construcción de vivienda, por lo tanto, se realizó un análisis comparativo de costo/m² entre la construcción convencional y la I3DMC (Tabla 6), considerando que: (i) el costo promedio para la vivienda convencional en México desde 2019 hasta 2024 aumentó de \$5,777.5-\$6,213/m² a \$6,896.55-\$9,266/m², mientras que el costo directo de vivienda de interés social aumentó 2.07% de marzo de 2023 a marzo de 2024 (CMIC-CEICO, 2023; GAMA Arquitectura, 2024; GRUPO QVICK, 2023; Miranda, 2019); (ii) Kreiger y col. (2019) estimaron que la construcción de vivienda impresa en 3D alcanzó una reducción de costo del 10-25% o 25-37% con respecto de utilizar mampostería o concreto convencional, respectivamente; asimismo, en 2023 se estimó que la reducción de costo con respecto de la construcción convencional alcanzó el 50% en India, mientras que, el costo promedio en Rusia alcanzó los \$4770/m²; por otro lado, en 2018 la empresa ICON imprimió casas de 60 m² por un costo promedio de \$2800/m² en Austin, planteando reducirlo a \$1200/m² en el Salvador (EnteUrbano, 2020; Forbes México, 2018; Kreiger y col. 2019; Vijayalaxmi y col., 2023). Así, para un estrato socioeconómico medio y bajo, se puede estimar que el costo en México podría reducirse de \$6,000-\$9,000/m² a \$1,700-\$4,500/m², involucrando adicionalmente la reducción de los desperdicios en obra, flexibilidad de diseño y menor tiempo de construcción. Cabe mencionar que la composición general de la relación ganancia/costo de las construcciones ronda los 2/1-3/1 y se puede establecer que el 50% del costo de construcción es por mano de obra y 50% por materiales.

Tabla 6. Comparación de costo/m² de la construcción convencional e impresión 3D para México.

Producto	Precio por m ² de construcción (MXN)	Características	Población beneficiada
Vivienda de construcción convencional (modular)	\$6000 – \$9,000	Cuentan con garantía durante el primer año. Características aislantes. Diseños preestablecidos. Alto costo para la población en pobreza y pobreza extrema	Clase baja y media, individuos o parejas con/sin hijos
Vivienda de concreto impreso en 3D	\$1,700 – \$4,500	Reducción de desperdicios en obra. Diseños flexibles. Menor costo de mano de obra. Menor tiempo de construcción.	

Un segundo análisis puede realizarse considerando que el desempeño de las tecnologías de I3DMC permiten (i) la construcción de viviendas asegurando la calidad de los materiales y la durabilidad, así como la seguridad estructural de los materiales, incluso ante desastres naturales, (ii) incidir positivamente en los créditos y apoyos sin importar su naturaleza, esto debido a la reducción de los costos de la vivienda, así como (iii) proporcionar las características de habitabilidad estipuladas por ONU-Hábitat (2019) y el IVNL (2021), especialmente acercando la meta del 30% del ingreso determinado para la vivienda asequible (ONU-Hábitat, 2019). Así, sería posible financiar un costo de \$8mil-\$14mil dólares en 5-8 años (ArchDaily, 2015) al considerar como ejemplo el ingreso promedio en NL (Gobierno de México, 2023a) y el costo del proyecto de la Arq. Tatiana Bilbao, no obstante, su proyecto fue diseñado para construcción convencional, por lo que utilizar I3DMC supondría una mejora de resistencia, durabilidad, sostenibilidad, costos, etc.

De esta manera, la construcción de vivienda por I3DMC promueve por sus características el alcance de la ViDAS de una manera que no se habían propuesto anteriormente en la IC, en contraste con diversificar los apoyos a los solicitantes, pero no tratan con el problema medular de la vivienda actual: su costo. Esto le brindaría acceso a ViDAS al sector vulnerable de la población, pero

también sugiere el alcance de niveles de sostenibilidad superiores a la población con un ingreso mayor, ya que, por el costo de la vivienda comercial convencional, se podrían adicionar tecnologías de alta eficiencia energética, recubrimientos y cementantes autorreparables o fotocatalíticos para la captura de CO₂, ventanas inteligentes, paneles y calentadores solares, diseños bioclimáticos usando geometrías complejas, etc. No obstante, hace falta investigación y desarrollo de tecnología mexicana en materia de tintas cementantes e impresoras 3D con base en los criterios de diseño eficiente de EC, haciendo disponibles estas tecnologías a la población y los desarrolladores de vivienda de manera más asequible en nuestro país.

4.1. Análisis la circularidad de la ViDAS impresa en 3D: posible escenario para México

En favor del desarrollo sostenible del país y con base en tecnología mexicana, la construcción con I3DMC fomenta una drástica disminución de costos, la cual sería suficiente para brindar ViDAS a las PIDLB. Esto podría disminuir de manera importante los problemas socioambientales con estrategias como: (i) aprovechar los subsidios actuales para adquirir-mejorar-ampliar una vivienda, facilitando el acceso a financiamientos y previniendo la morosidad por los montos menores, los cuales serían más proporcionales al ingreso de las PIDLB. Esto reduce los tiempos de financiamiento y, sobre todo, permite respetar el límite del 30% del ingreso establecido por ONU-Hábitat (2019) que determina una vivienda asequible, así como solucionar las CCEV, lo que por otro lado apoya a la satisfacción del resto de las necesidades básicas. (ii) La eficiencia del proceso constructivo por I3DMC resulta en la generación de vivienda rápida de costo asequible, permitiendo abatir el déficit de vivienda, incluso con una demanda alta. Esto también promueve una planeación urbana mejorada que logre la colocación y evite las viviendas deshabitadas construidas con I3DMC. (iii) El acceso de las PIDLB al mercado de la ViDAS mitiga el problema de la vivienda informal (p.ej., autoconstrucción, falta de mantenimiento, precariedad, crecimiento urbano descontrolado, poca integración social, asentamiento en zonas de preservación ecológica, vulnerabilidad ante fenómenos naturales, riesgo estructural, poca protección del exterior, etc.), debido al cumplimiento de los requerimientos para una vivienda digna y decorosa según ONU-Hábitat y la Constitución Mexicana, es decir, viviendas construidas mediante materiales duraderos, resistentes y de calidad en pisos, muros y techos de I3DMC, utilizando un diseño eficiente energética, estructural y arquitectónicamente que optimice los espacios, su funcionalidad, el consumo energético, el confort y el uso de recursos de la vivienda, cumpliendo con permisos y reglamentos de construcción en suelo urbanizable de vivienda formal, realizada bajo la supervisión especializada en I3DMC, asegurando el acceso a servicios públicos y disminuyendo el hacinamiento y rezago habitacional. (iv) Asimismo, puede dar solución a los problemas de mejoramiento y ampliación de vivienda, vivienda provisional, así como en espacios públicos en comunidades y colonias. Cabe señalar que los elementos impresos tienen mejores propiedades en comparación con el block, el ladrillo o la madera, por lo que minimizan la necesidad de mantenimientos, extendiendo la vida útil, por lo que pueden mejorar otras propuestas de vivienda asequible como el de Tatiana Bilbao (ArchDaily, 2015). (v) Todo lo anterior mejora la calidad de vida y salud de los habitantes, mientras que la reducción del impacto ambiental de la IC podría alcanzar las metas de sostenibilidad mientras mantiene su papel preponderante en el país en términos económicos. Además, se debería dar lugar a alianzas estratégicas y políticas públicas para facilitar la adquisición de ViDAS impresas en 3D, principalmente para PIDLB.

En términos de los ODS (Naciones Unidas, 2015), la I3DMC incide mediante la disminución de las emisiones de CO₂, demanda energética, generación de desechos, uso intensivo de recursos naturales, y aumentando la reutilización de subproductos y recursos locales, esto conforme se desarrollen procesos y tecnologías más eficientes: (i) La I3DMC permite el uso eficientemente los materiales de construcción, dosificando y depositando cantidades precisas de agua, cemento, aditivos, agregados pétreos, etc. Esto reduce la extracción en canteras, desechos de obra, así como

las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de materiales, lo cual indirectamente también promueve un costo asequible de ViDAS. Asimismo, la ocupación de ViDAS evita asentamientos irregulares en zonas eco-protegidas, fomentando el crecimiento controlado de las ciudades. Lo anterior incide en el ODS-6 de agua limpia y saneamiento, ODS-7 de energía asequible y no contaminante, así como el ODS-15 de vida de ecosistemas terrestres. (ii) Ya que se optimiza la eficiencia e impacto ambiental mediante la digitalización y automatización de un robot multifuncional, y promueve la construcción modular, se incide en el ODS-9 de industria, innovación e infraestructura y ODS-12 de producción y consumo responsable. (iii) La construcción de ciudades por impresión 3D mitiga el cambio climático debido a las prácticas de bajo impacto ambiental, el diseño eficiente, bioclimático y sostenible, la extensión de la durabilidad, la optimización de recursos, etc. Además, requiere de alianzas estratégicas del sector público y privado para lograr los ODS, el desarrollo de investigación y nuevas tecnologías mexicanas para la construcción de ViDAS. Esto incide en el ODS-11 de ciudades y comunidades sostenibles, ODS 13 de acción por el clima y ODS-17 de alianzas para lograr los ODS. (iv) Otros beneficios de la I3DMC se relacionan con: el ODS-3 de salud y bienestar, al mejorar la calidad de vida de las personas; ODS-8 de trabajo decente y crecimiento económico, al crear nuevas oportunidades económicas, empresas y modelos de negocio sostenibles; ODS-4 de educación de calidad, porque el desarrollo tecnológico de I3DMC permite a los estudiantes aprender simultáneamente de diseño, ciencia, ingeniería y procesos de manufactura de forma práctica.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo sostenible de México mediante la aplicación de la Economía Circular en la Industria de la Construcción brinda soluciones como la impresión 3D de mezclas cementantes, lo cual permitiría brindar la vivienda digna, asequible y sostenible a la población en general, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas y del Gobierno Federal. Esto es por las diversas ventajas asociadas a la automatización del proceso constructivo mediante un robot, destacando (i) la disminución de la mano de obra, los accidentes y errores humanos, (ii) la optimización en el uso de materiales y control de calidad de las propiedades debido a la precisión durante el procedimiento de mezclado, bombeo e impresión de las mezclas cementantes, así como (iii) el alto desempeño constructivo, que reduce los tiempos de construcción y permite la construcción modular mediante prefabricados impresos en 3D. Lo anterior implica una reducción importante del impacto ambiental y los costos (desde \$6,000-\$9,000/m² hasta \$1,700-\$4,500/m²) con respecto de la construcción convencional según las estimaciones actuales, pero superando en calidad por desempeño mecánico y de durabilidad a otras propuestas sostenibles existentes o igualando el desempeño del concreto convencional mediante la optimización adecuada de las propiedades de los elementos impresos en 3D. No obstante, es posible alcanzar ventajas superiores utilizando (i) tecnologías mexicanas de cementantes alternativos o materiales de desecho para las tintas, (ii) además de implementar, por el mismo costo de la vivienda comercial convencional, tecnologías avanzadas de alta eficiencia energética, captura de CO₂, ecotecnologías, diseños arquitectónicos bioclimáticos, etc. Se espera que este trabajo contribuya en la difusión y discusión en torno a las soluciones nacionales para la integración de (i) la economía circular en la industria de la construcción, (ii) conseguir la vivienda digna, asequible y sostenible, así como (iii) el desarrollo de la tecnología mexicana de impresoras 3D y tintas cementantes, dando lugar a empresas de base tecnológica en esta área.

6. AGRADECIMIENTOS

J.H. Díaz-Aguilera, J.R. Zapata-Padilla, S. Mares-Chávez, F.D. Anguiano-Pérez, M.I. Velásquez-Hernández, E.E. Espino-Robles, J.I. Alvarado-López y J.A. Mendoza-Jiménez agradecen al CONAHCYT por las becas brindadas para los CVU 929098, 946425, 1346629, 554927, 1041129, 1305949, 994896 y 591308, respectivamente.

8. REFERENCIAS

- Abdalla, H., Fattah, K.P., Abdallah, M., Tamimi, A.K. (2021), *Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House*. Sustainability. 13:11978. <https://doi.org/10.3390/su132111978>.
- Adesina, A. (2020), *Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions*. Env. Challen. 1:100004. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>
- Adesina, A. (2021), *Circular Economy in the Concrete Industry*. Build. Eng. 43:103233. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233>
- Ahmed, G.H. (2023) *A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability*. J. Build. Eng. 66:105863. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105863>
- Alkhalidi, A, Hatuqay, D. (2020), *Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study*. J. Build. Eng. 30:101286. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101286>
- ArchDaily (2015), *Tatiana Bilbao’s \$8,000 House Could Solve Mexico’s Social Housing Shortage*. Accesado el 28 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.com/775233/tatiana-bilbao-8000-house-could-solve-mexicos-social-housing-shortage>
- ArchDaily (2018), *Dubai planifica imprimir en 3D el 25% de sus nuevos edificios en 2025*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.mx/mx/901205/dubai-planifica-imprimir-en-3d-el-25-percent-de-sus-nuevos-edificios-en-2025>
- ArchDaily (2021a), *El futuro es ahora: Casas impresas en 3D comienzan a ser habitadas en los Países Bajos*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.mx/mx/961093/el-futuro-es-ahora-casas-impresas-en-3d-comienzan-a-ser-habitadas-en-los-paises-bajos#:~:text=los%20Pa%C3%ADses%20Bajos-,El%20futuro%20es%20ahora%3A%20Casas%20impresas%20en%203D%20comienzan%20a,habitadas%20en%20los%20Pa%C3%ADses%20Bajos&text=Si%20hace%20algunos%20a%C3%B1os%20la,que%20ha%20llegado%20para%20quedarse>.
- ArchDaily (2021b), *La estética de la automatización: análisis de una vivienda asequible impresa en 3D*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <https://www.archdaily.mx/mx/964468/la-estetica-de-la-automatizacion-analisis-de-una-vivienda-asequible-impresa-en-3d>
- Arunothayan, R., Nematollahi, B., Bong, S.H., Ranade, R., Sanjayan, J. (2020), *Hardened Properties of 3D Printable Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete for Digital Construction Applications*. Rheol. Proc. Constr. Mater. 23: 355–362). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7_41
- Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., Sehrawat, R. (2021), *“Handbook of Solid Waste Management”*, Singapore, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7525-9_64-1
- Baz, B., Aouad, G., Leblond, P., Al-Mansouri, O., D’hondt, M., Remond, S. (2020). *Mechanical assessment of concrete – Steel bonding in 3D printed elements*. Constr. Build. Mater. 256:119457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119457>
- Be more 3D (2024), *Por fin construcción y sencillez unidas*. Accesado el 11 de abril de 2024 en: <https://bemore3d.com/>

Buswell, R.A., Soar, R.C., Gibb, A.G.F., Thorpe A. (2007), *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*. Automation in Construction, Volume 16, Issue 2, Pages 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>.

CEMEX (2022), *CEMEX es la primera compañía que introduce impresión 3D con concreto en México*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: [https://www.cemexmexico.com/-/cemex-es-primera-compa%C3%B1a-que-introduce-impresi%C3%B3n-3d-con-concreto-en-m%C3%A9xico#:~:text=CEMEX%20es%20Primera%20Compa%C3%B1a%20que%20Introduce%20Impresi%C3%B3n%203D%20con%20Concreto%20en%20M%C3%A9xico,-Monterrey%2C%20M%C3%A9xico%2004&text=CEMEX%2C%20S.A.B.%20de%20C.V.%20\(%E2%80%9C,y%20de%20grado%20de%20construcci%C3%B3n](https://www.cemexmexico.com/-/cemex-es-primera-compa%C3%B1a-que-introduce-impresi%C3%B3n-3d-con-concreto-en-m%C3%A9xico#:~:text=CEMEX%20es%20Primera%20Compa%C3%B1a%20que%20Introduce%20Impresi%C3%B3n%203D%20con%20Concreto%20en%20M%C3%A9xico,-Monterrey%2C%20M%C3%A9xico%2004&text=CEMEX%2C%20S.A.B.%20de%20C.V.%20(%E2%80%9C,y%20de%20grado%20de%20construcci%C3%B3n).

CentroUrbano (2023), *Nuevo León presenta su Programa Especial de Vivienda 2022-2027*. Accesado el 29 de septiembre de 2023 en: <https://centrourbano.com/vivienda/nuevo-leon-programa-vivienda/>

Cicione, A., Kruger, J., Richard, Walls, S., Van Zijl, G. (2021), *An experimental study of the behavior of 3D printed concrete at elevated temperatures*. Fire Safety J. 120:103075. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103075>.

CMIC-CEICO (2023), *Principales variaciones en el precio de los insumos y su impacto en las obras*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: https://www.cmic.org.mx/comisiones/Tematicas/costosyp/Informes_IPP/2023/CEICO_Informe_Octubre_2023.pdf

Colorado, H. A., Velásquez, E. I. G. Monteiro, S. N. (2020), *Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives*. J. Mater. Res. Tech. 9(4):8221-8234. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>

De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G., Agusti-Juan, I. (2018), *Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials*. Cem. Concr. Res. 112:25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

De Souza, E.A., Borges, P.H., Stengel, T., Nematollahi, B., Bos, F.P. (2024), *3D printed sustainable low-cost materials for construction of affordable social housing in Brazil: Potential, challenges, and research needs*. J. Build. Eng. 87:108985. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108985>

Díaz-Aguilera, J.H. (2024), *“Estudio del diseño eficiente, optimización, durabilidad y sostenibilidad de una pasta de cemento activado alcalinamente con base en metacaolín y piedra caliza”*, Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Ding, T., Xiao, J., Zou, S., Zhou, X (2020), *Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers*. Compos. Struct., 254:112808. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112808>

El Economista. (2022a). *Hay que hacer algo rápido: Gene Towle sobre la falta de oferta de vivienda social*. Accesado el 29 de agosto de 2023 en: <https://www.eleconomista.com.mx/econohabitat/Hay-que-hacer-algo-rapido-Gene-Towle-sobre-la-falta-de-oferta-de-vivienda-social-20220325-0091.html>

El Economista (2022b), *Canadevi advierte rezago del 30% en colocación de vivienda en Nuevo León*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Canadevi-advierete-rezago-del-30-en-colocacion-de-vivienda-en-Nuevo-Leon-20220921-0129.html>

El Economista (2023), *Nuevo León se presentará un programa para complementar créditos por déficit de 16,000 viviendas*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Nuevo-Leon-se-presentara-un-programa-para-complementar-creditos-por-deficit-de-16000-viviendas-20230423-0008.html>

- El Inaty, F., Baz, B.A., Aouad, G. (2022). *Long-term durability assessment of 3D printed concrete*. J. Adhesion Sci. Technol. 37:1-16. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2102717>
- EnteUrbano (2020), *¿Cuánto cuesta una casa impresa en 3D?*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: https://enteurbano.com/cuanto-cuesta-una-casa-impresa-en-3d/#google_vignette
- European Parliament (2023), *Circular economy: definition, importance and benefits*. Accessed 17 April 2024 in: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Forbes México (2018), *100 casas serán construidas con impresoras 3D en El Salvador*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: <https://www.forbes.com.mx/casas-seran-construidas-con-impresoras-3d-en-el-salvador/>
- Fořt, J., Černý, R. (2020), *Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios*. Was. Manag. 118:510-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
- García-Alvarado, R., Martínez, A., González, L., Auat, F. (2020), *Projections of 3D-printed construction in Chile*. Rev. Ing. Constr. 25:60-72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100060>
- GAMA Arquitectura (2024), *¿Cuánto cuesta construir una casa en México?*. Accesado el 17 de abril de 2024 en: <https://www.tallergama.com/cuanto-cuesta-construir-una-casa/>
- Gobierno de México (2023a), *Data México: Nuevo León*. Accesado el 27 de septiembre de 2023 en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/nuevo-leon-nl>
- Gobierno de México (2023b), *Conferencia Matutina Jueves 9 de febrero de 2023*. Accesado el 5 de octubre de 2023 en <https://www.youtube.com/watch?v=et4AjkIs8w>
- GRUPO QVICK (2023), *¿Cuánto cuesta construir una casa en 2024? – México*. Accesado el 18 de abril de 2024 en: <https://www.grupoqvick.com/post/cu%C3%A1nto-cuesta-construir-una-casa-en-2023#:~:text=Construir%20una%20casa%20de%20inter%C3%A9s,es%20de%20%2423%2C762.37%2F%20m%20promedio>
- He, Y., Zhang, Y., Zhang, C., Zhou, H. (2020), *Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall*. Energy Build. 222:110110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110110>
- HOLCIM México (2024), *Impresión 3d en la construcción: transformando el futuro con holcim*. Accesado el 18 de abril de 2024 en: <https://www.holcim.com.mx/impresion-3d>
- Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P., Ben Amor (2020), *Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction*. Ren. Sust. Ener. Rev. 130:109948. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>
- INEGI (2020), *Panorama sociodemográfico de México 2020*. Accesado el 26 de septiembre de 2023 en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197926.pdf
- INEGI (2021), *Encuesta Nacional de Vivienda 2020*. Accesado el 27 de septiembre de 2023 en: <https://inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/envi/ENVI2020.pdf>
- INEGI (2023), *Indicador mensual de la actividad industrial por entidad federativa 2023*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/imaief/imaief2023_06.pdf
- Instituto de la Vivienda (2021), *Diagnostico Instituto de la Vivienda de Nuevo León*. Accesado el 9 de octubre de 2023 en: https://pbr-sed.nl.gob.mx/sites/default/files/diagnostico_ivnl.pdf

- Interempresas (2020), *Arquitectura y construcción*. Accesado el 28 de septiembre de 2023 en: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/298814-Cada-metro-cuadrado-construido-en-edificacion-residencial-supone-441-Kg-de-CO2.html>
- Jo., J.H., Jo, B.W., Cho, W., Kim, J.H. (2020). *Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials*. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 14:13. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>
- Joh, C., Lee, J., Bui, T.Q., Park, J., Yang, I.H. (2020), *Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete*. *Materials*, 13(21):4919. <https://doi.org/10.3390/ma13214919>
- Kaliyavaradhan, S. K., Tung-Chai, L., Mo, K. H. (2020), *CO2 sequestration of fresh concrete slurry waste: Optimization of CO2 uptake and feasible use as a potential cement binder*. *J. CO2 Util.* 42:101330. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101330>
- Khan, S.A., Koç, M., Al-Ghamdi, S.G. (2021), *Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications*. *J. Clean. Prod.* 303:127027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>
- Kreiger, E., Kreiger, M., Case, M. (2019), *Development of the Construction Processes for Reinforced Additively Constructed Concrete*. *Additive Manufact.* 28:39-49. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.015>
- Liu, C., Yue, S., Zhou, C., Sun, H., Deng, S., Gao, F., Tan, Y. (2021), *Anisotropic mechanical properties of extrusion-based 3D printed layered concrete*. *J. Mater. Sci.* 56(30):16851–16864. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06416-w>
- Lozano, G.O., Sánchez, O.S. (2022), *Vivienda en México, un problema de calidad, de habitabilidad, del barrio y de la ciudad. Variantes a la medición del rezago*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: https://revistaeypp.flacso.org.ar/files/revistas/1667932268_143-171.pdf
- Ma, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., Sanjayan., J. (2019), *Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing*. *Constr. Build. Mater.* 202:770-783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
- MARQ (2021). *Se logra impresión 3D del concreto más resistente*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: <https://marq.mx/es/se-logra-impresion-3d-del-concreto-mas-resistente/>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., Bernal, S. A. (2022), *Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration*. *J. Clean. Produc.* 362:132486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- Murcia, D.H., Genedy, M., Taha., M.M.R. (2020), *Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete*. *Constr. Build. Mater.* 262:120559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559>
- Maury-Ramírez, A., Illera-Perozo, D., Mesa, J. A. (2022), *Circular Economy in the Construction Sector: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia)*. *Sust.* 14(3):1923. <https://doi.org/10.3390/su14031923>
- Mendoza-Rangel, J.M., Díaz-Aguilera, J.H. (2023), *Circular economy in the Latin American cement and concrete industry: a sustainable solution of design, durability, materials, and processes*. *Revista ALCONPAT.* 13:328-348. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>
- Milenio (2018), *NL, entre los estados que generan más basura: Inegi*. Accesado el 26 de septiembre de 2023 en: <https://www.milenio.com/estados/nl-entre-los-estados-que-generan-mas-basura-inegi>
- Miranda, P.E. (2019), “*Análisis de costos entre vivienda de interés social vertical y vivienda de interés social horizontal en San Juan del Río*”, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Mohan, M.K., Rahul, A.V., van Dam, B., Zeidan, T., De Schutter, G., Van Tittelboom, K. (2022) *Performance criteria, environmental impact and cost assessment for 3D printable concrete mixtures*. *Resour. Conserv. Recycl.* 181:106255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106255>

- Moelich, G.M., Kruger, J., Combrinck, R. (2020), *Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete*. Compos. Part B: Eng., 200:108313. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108313>.
- Motalebi, A., Khondoker, M.A.H., Kabir, G. (2023). *A Systematic Review of Life Cycle Assessments of 3D Concrete Printing*. Sust. Operat. Computs. 5:41-50. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.08.003>
- Natives3D (2018). *Sika, el especialista en impresión 3D de concreto*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: <https://www.3dnatives.com/es/sika-impresion-3d-de-concreto-220520182/>
- Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J. (2017), “*Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies*.” en: 34th ISARC, Taipei (Taiwan), pp. 260-267. <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0035>.
- Nodehi, M., Aguayo, F., Nodehi, S.E., Gholampour A., Ozbakkaloglu, T. & Gencil O. (2022). *Durability properties of 3D printed concrete (3DPC)*. Autom. Constr. 142:104479. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104479>
- NoParast, M., Hematian, M., Ashrafiyan, A., Amiri, M. J. T., Jafari, H. A. (2021), *Development of a non-dominated sorting genetic algorithm for implementing circular economy strategies in the concrete industry*. Sust. Prod. & Cons. 27:933-946. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.009>
- OSHA (2022), *Commonly Used Statistics | Occupational Safety and Health Administration*. Accesado el 31 de agosto de 2023 en: <https://www.osha.gov/data/commonstats>
- Özalp, F., Yilmaz, H.D. (2020), *Fresh and Hardened Properties of 3D High-Strength Printing Concrete and Its Recent Applications*. Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng., 44(S1):319–330. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00370-4>
- Perales-Santillan, M.E., Díaz-Aguilera, J.H., Mendoza-Rangel, J.M. (2024), *Evaluation of the rheological behavior for alkaline-activated cements of metakaolin and limestone for its potential application in 3D printing*. Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01363-3>
- Paz-Pérez, C.A. (2016), “*El impacto de la sustentabilidad en la vivienda en serie de nuevo león*”, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Pérez-Cortes, P., Escalante-García, J.I. (2020), *Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaoline A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers*. J. Crean. Prod. 273:123118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>
- Rahul, A.V., Santhanam, M., Meena, H., y Ghani, Z. (2019), *Mechanical characterization of 3D printable concrete*. Constr. Build. Mater., 227:116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
- Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., Villaquirán-Caicedo, M.A., Arjona, S.D. (2023), *3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector*. Autom. Constr. 146:104693. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
- Rosas-Díaz, F., García-Hernández, D.G., Mendoza-Rangel, J.M., Terán-Torres, B., Galindo-Rodríguez, S.A., Juárez-Alvarado, C.A. (2022), *Development of a Portland Cement-Based Material with Agave salmiana Leaves Bioaggregate*. Maters. 17:6000. <https://doi.org/10.3390/ma15176000>
- Ruiz-Jaramillo, C. (2021), “*Development of a cement-based extrusion system for application in 3D printing*”, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Şahin, H. G., Mardani-Aghabaglou, A. (2022), *Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review*. Constr. Build. Maters. 316:125865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125865>
- Sanjayan, J.G., Nazari, A., Nematollahi, B. (2019), “*3D concrete printing technology: construction and building applications*”, MA: Butterworth-Heinemann, Cambridge, England.

- Schuldt, S.J., Jagoda, J.A., Hoisington, A.J., Delorit J.D. (2021), *A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments*. Autom. Constr. 125:103642. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103642>
- Secretaría de Desarrollo Sustentable (2020), *Norma ambiental estatal NAE-SDS-002-2019*. Accesado el 30 de septiembre de 2023 en: <http://aire.nl.gob.mx/docs/normatividad/NAE-SDS-002-2019.pdf>
- Senado de la República (2021), *El 50 por ciento de las emisiones contaminantes pertenecen al sector de la construcción*. Accesado del 26 de septiembre de 2023 en: <http://comunicacion.senado.gob.mx/index.php/informacion/boletines/50135-el-50-por-ciento-de-las-emisiones-contaminantes-pertenecen-al-sector-de-la-construccion.html>
- Sikora, P., Techman, M., Federowicz, K., El-Khayatt, A.M., Saudi, H.A., Elrahman, M.A., Hoffmann, M., Stephan, D., Chung, S.Y., (2022) *Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens*. C. Stud. Constr. Mater. 17:e01320. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01320>
- Song, H., Li, X. (2021). *An Overview on the Rheology, Mechanical Properties, Durability, 3D Printing, and Microstructural Performance of Nanomaterials in Cementitious Composites*. Materials. 14:2950. <https://doi.org/10.3390/ma14112950>
- Tecnológico de Monterrey. (2021). *Los matices de la vivienda en México*. Accesado el 25 de septiembre de 2023 en: <https://futurociudades.tec.mx/es/los-matices-de-la-vivienda-en-mexico>
- UANL-FIC (2023), *1er Simposio del Cuerpo Académico Consolidado de Tecnología del Concreto “La Industria de la Construcción y la Economía Circular: Estrategias y Avances en Sostenibilidad”*. Accessed 21 May 2024 in: <https://fic.uanl.mx/1er-simposio-cactc2023/>.
- UN-Habitat (2019), *Elements of adequate housing*. Accessed 25 September 2023 in: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/elementos-de-una-vivienda-adeuada>
- United Nations (2015), *Sustainable development goals*. Accessed 1 September 2023 in: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- UNEP (2020), *Building sector emissions hit record high in 2019: UN report*. Accessed 28 September 2023 in: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/emisiones-del-sector-de-los-edificios-alcanzaron-nivel#:~:text=Eficiencia%20de%20recursos-,Emisiones%20del%20sector%20de%20los%20edificios%20alcanzaron%20nivel,2019%3A%20Informe%20de%20la%20ONU&text=La%20operaci%C3%B3n%20y%20construcci%C3%B3n%20de,2%20relacionadas%20con%20la%20energ%C3%ADa.>
- Van Breugel, K. (2017). “Ageing Infrastructure and Circular Economy: Challenges and Risks”, in: *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, CSEE’17, Barcelona (España)*, pp. 1-8.
- Van Der Putten, J., De Volder, M., Van den Heede, P., De Schutter, G., Van Tittelboom, K. (2020), *3D Printing of Concrete: The Influence on Chloride Penetration*, RILEM Inter. Conf. Concr. Digital Fabric. 28(2):500-507. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_51
- Velvizhi, G., Shanthakumar, S., Das, B., Pugazhendhi, A., Priya, T.S., Ashok, B., Nanthagopal, K., Vignesh, R., Karthick, C. (2020), *Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy*. Sci. Total Environ. 731:138049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A., Tobón, J., John, V.M. (2022), *Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality*. RILEM techn. Let. 7:30-46. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>

- Vijayalaxmi, J., Parth, S. (2023), *Comparative analysis of concrete 3D printing and conventional construction technique for housing*. Innov. Proc. Mater. Additive Manufac. 177-190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-86011-6.00011-8>
- WINSUN (2014), *Company news*. Accesado el 1 de septiembre de 2023 en: <http://www.winsun3d.com/En/News/index/p1/2>
- Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M. (2019), *Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion*. Cem. Concr. Res., 119:132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
- Xiao, J., Han, N., Zhang, L., Zou, S. (2021), *Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures*. Constr. Build. Mater. 293:123524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123524>
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A.I., Fawzy, S., Rooney, D.W., Pow-Seng, Y. (2022), *Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues*. Env. Chem. Let. 21:55-80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
- Ye, J., Cui, C., Yu, J., Yu, K., Xiao, J. (2021), *Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber*. Compos. Part B: Eng., 211:108639. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108639>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Yang, L., Liu, G., Chen, Y., Yu, S., Du, H. (2021), *Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials*. Mater. Struct. 54:1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01632-x>