

## Economia circular na indústria de construção por impressão 3D: uma solução de design, durabilidade, materiais e processos para alcançar habitação digna, acessível e sustentável em Nuevo León e no 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 Contato: [jhda\\_ic24@hotmail.com](mailto:jhda_ic24@hotmail.com)

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

Recebido: 22/04/24 | Correções recebidas: 10/05/2024 | Aceito: 13/05/2024 | Publicado: 17/05/2024

### 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 CO<sub>2</sub>, 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/m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** 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), “Economia circular na indústria de construção por impressão 3D: uma solução de design, durabilidade, materiais e processos para alcançar habitação digna, acessível e sustentável em Nuevo León e no México.”, Revista ALCONPAT, 14 (2), pp. 115 – 140, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Nuevo León, México.

#### Contribuição de cada autor

J.M. Mendoza-Rangel: conceituação, recursos, supervisão e administração do projeto. J. H. Díaz-Aguilera: ideia original, coleta de dados (60%), escritura do trabalho e discussão do trabalho (60%). JR Zapata-Padilla, S. Mares-Chávez, FD. Anguiano-Pérez, M.I. Velásquez-Hernández, EE Espino-Robles, JI. Alvarado-López e J.A. Mendoza-Jiménez contribuiu com a revisão, edição, coleta de dados e discussão do trabalho em porcentagens iguais.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2023) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2025, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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 CO<sub>2</sub> 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/m<sup>2</sup>.

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

## **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**

### **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 CO<sub>2</sub>, 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/m<sup>2</sup>.

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

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## INTRODUÇÃO

A Economia Circular (EC) é um paradigma global que promove a participação de todos os setores da sociedade (público, privado, acadêmico e sociedade civil) para alcançar uma melhor qualidade de vida baseada na sustentabilidade dos países. As indústrias estão adotando um modelo de produção e consumo baseado no compartilhamento, aluguel, reutilização, reparação, renovação e reciclagem dos recursos existentes, de forma a gerar valor agregado aos produtos e materiais, influenciando tanto a produção como a comercialização, bem como na sua reintegração em novos ciclos da produção e do consumo (Parlamento Europeu, 2023). Desta forma, o ciclo de vida dos materiais é prolongado, sendo incorporados repetidamente na fabricação de novos produtos como matérias-primas circulares, o que reduz ao mínimo os resíduos industriais.

Se um produto chega ao fim da sua vida útil, os seus materiais são mantidos nas cadeias de valor e abastecimento sempre que for possível a reciclagem, reparação, renovação etc., incluindo o compartilhamento das matérias-primas circulares entre indústrias de diferentes tipos, o que pode exigir o condicionamento de materiais, sua transformação, controle de qualidade etc. Portanto, a circularidade faz parte do projeto eficiente de materiais para alcançar a otimização de processos, controle de qualidade e durabilidade dos elementos construtivos (Mendoza-Rangel e Díaz-Aguilera, 2023; Yang et al., 2022). Este modelo circular contrasta com o modelo econômico linear convencional, baseado principalmente no “usar e jogar fora” ou de obsolescência planejada, que requer grandes quantidades de materiais e energia, baratos e de fácil acesso, que associa o consumo não sustentável dos recursos naturais (Parlamento Europeu, 2023). Assim, vários autores em todo o mundo (Adesina (2020), Van Breugel (2017) e Villagrán- Zaccardi et al. (2022)), têm aplicado os princípios da CE na Indústria da Construção (IC) para desenvolver materiais, tecnologias e processos mais sustentáveis em relação à construção convencional. Os esforços da IC em EC podem ser classificados em sete áreas principais (Mendoza-Rangel e Díaz-Aguilera, 2023): (i) Digitalização, (ii) Inovações tecnológicas, (iii) Projeto eficiente, (iv) Materiais reciclados, (v) Extensão de vida útil, (vi) Recursos locais, e (vii) Processos eficientes. O escopo e os benefícios das sete áreas tendem a se sobrepor dependendo do modelo de EC a ser desenvolvido para a IC, e podem incluir a fabricação de materiais de construção, aditivos químicos, agregados reciclados, processos de construção, projeto de mistura, otimização de propriedades (por exemplo, mecânicas, durabilidade, térmicas, etc.), projetos de edificações e infraestrutura, ou qualquer outro tipo de aplicação.

No que diz respeito à digitalização da IC, isto é conseguido através da introdução de elementos tecnológicos para conseguir a otimização dos materiais e das suas propriedades, processos de fabricação e construção etc. (NoParast et al., 2021), favorecendo a sustentabilidade da indústria e a redução da pegada de carbono. Alguns exemplos são: (i) a redução da geração de resíduos por meio do controle preciso da dosagem e mistura dos materiais, utilizando sensores de monitoramento em tempo real, o que também reduz a variabilidade das propriedades resultantes (Adesina, 2021; NoParast et al., 2021); (ii) o controle da composição química durante a produção de materiais por meio de modelagem estatística avançada, utilizando software (Perez -Cortes e Escalante- Garcia , 2020); (iii) controle de qualidade do projeto, materiais e processos por meio de Inteligência Artificial ou modelagem BIM (Adesina, 2021; Hossain et al., 2020; Marsh et al., 2022); ( iv ) a redução dos tempos de construção ou de fabricação de elementos pré-fabricados através da utilização de robôs e máquinas automatizadas, que podem mesmo funcionar 24 horas por dia e sete dias por semana com o mesmo desempenho, como a impressão 3D ( Fořt e Černý, , 2020; Robayo-Salazar e col, 2023); (v) o desenvolvimento de materiais e elementos construtivos circulares considerando um projeto eficiente que permita maximizar tanto a durabilidade durante a primeira vida de serviço, como a circularidade para reparar o material, reincorporá-lo em novos ciclos de vida como matéria-prima no mesmo tipo de processo, em outra nova aplicação em IC ou

mesmo em outra indústria; etc. (Velvizhi et al., 2020).

Entre as opções relacionadas com a digitalização de IC, a impressão 3D de misturas cimentícias (I3DMC) é uma das tecnologias com mais vantagens em termos de desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade, pois permite a criação de elementos de construção tridimensionais, arquitetônicos e estruturais, camada por camada a partir de um projeto digital, com precisão, eficiência, eficácia e a um custo significativamente menor em comparação com a construção convencional (ArchDaily, 2018; Colorado et al., 2020; Şahin et al., 2022; WINSUN, 2014). O I3DMC chamou a atenção da CEMEX e da HOLCIM, afirmando seu interesse em desenvolver essas tecnologias e aproveitá-las no mercado mexicano (CEMEX, 2022; HOLCIM México, 2024). No entanto, isto é feito em colaboração com a empresa de impressoras 3D de concreto COBOD, pelo que as inovações referidas são apenas para pinturas e revestimentos de base cimentícia. O I3DMC exige o desenvolvimento tecnológico de pinturas e revestimentos de base cimentícia e de impressoras 3D com características específicas: (i) as tintas associam propriedades que facilitam a sua impressão 3D (e.g., extrusão, capacidade de construção e bombeamento, bem como o tempo disponível para realizar a extrusão etc.) e podem ser feitos à base de diversos materiais além do cimento Portland (CP), como cimentos e geopolímeros ativados alcalinamente, solo argiloso, resíduos, etc. (Be more 3D, 2024; Colorado et al., 2020). Posteriormente, a pintura e revestimento de base cimentícia impressa endurece e deve apresentar propriedades mecânicas, de durabilidade e de sustentabilidade competitivas em relação ao concreto convencional (Colorado et al., 2020; Motalebi et al., 2023; Nohedi et al. 2022; Robayo-Salazar et al., 2022; Robayo-Salazar et al., 2023; (ii) A impressora 3D necessita de uma estrutura de suporte e sistemas de extrusão, bombeamento, movimentação em três direções (X, Y e Z), etc. Além disso, além de contribuir para a sustentabilidade do procedimento construtivo, a impressora 3D deve apresentar componentes que permitam alto desempenho e durabilidade, minimizando a manutenção nas condições adequadas (Jo et al., 2020; Şahin et al., 2022).

Por outro lado, a IC no México procura alternativas sustentáveis para alcançar a EC, tais como soluções para problemas de habitação, qualidade e espaço, incluindo acessibilidade, qualidade e resistência dos materiais, pisos de terra, habitação temporária, durabilidade e manutenção, entre outros. Isto se deve às declarações da ONU-Habitat, que estimou desde 2019 que 38,4% das residências no México são inadequadas (UN-Habitat, 2019). Portanto, o I3DMC é uma proposta de base tecnológica que poderia contribuir para a construção de moradias dignas, acessíveis e sustentáveis (ViDAS) de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (Nações Unidas, 2015). No entanto, a investigação e desenvolvimento tecnológico nesta área é limitado no México (Perales-Santilla et al., 2024; Ruiz-Jaramillo, 2021), razão pela qual é necessário especificar o estado da arte a nível internacional do I3DMC com a finalidade de analisar a sua aptidão de acordo com o contexto nacional e de fornecer diretrizes para viabilizar soluções inovadoras que mitiguem as mudanças climáticas e ao mesmo tempo transformem o IC para alcançar a construção do ViDAS. Isto pode incluir o desenvolvimento de tecnologia mexicana em torno de:

(i) pinturas e revestimentos de base cimentícia convencionais à base de concreto e argamassas que otimizam o uso do CP; (ii) pinturas e revestimentos de base cimentícia de baixo carbono que substituem parcialmente o uso do CP por matérias-primas alternativas (calcário, argilas calcinadas, subprodutos da indústria energética, agroindustrial, etc.); (iii) pinturas e revestimentos de base cimentícia alternativas que utilizam 0% de clínquer como cimentos ativados alcalinos, geopolímeros, etc.; (iv) sistemas construtivos modulares; (v) impressoras 3D de misturas cimentícias; (vi) concepção eficiente e sustentável de habitações baseada na otimização estrutural, durabilidade e prolongamento da vida útil, energia (por ex., utilização de energias renováveis como painéis solares, arquitetura bioclimática, materiais avançados como isolamento térmico, janelas inteligentes, etc.), de recursos hídricos (filtros para reuso de águas cinzentas,

etc.) e outros. Da mesma forma, deve ser destacada a importância da ligação entre os setores da sociedade para promover uma maior transferência tecnológica do setor científico para o setor industrial, que transforma a pesquisa em PIB no longo prazo. As alianças estratégicas entre os setores industrial, público e científico permitirão também que a IC desempenhe um papel como agente de transformação da EC para outras empresas e para a sociedade, favorecendo uma adaptação eficiente aos desafios da sustentabilidade.

Portanto, é apresentada uma análise do estado da arte do I3DMC em termos de propriedades mecânicas, durabilidade, sustentabilidade e custos, bem como o panorama habitacional no México, utilizando como base as condições internacionais para elucidar os requisitos atuais para alcançar ViDAS. Neste contexto, por se destacar como ponta de lança no desenvolvimento tecnológico do país, este trabalho apresenta uma análise do Estado de Nuevo León (NL) para determinar sua idoneidade para empreender o desenvolvimento do ViDAS através do I3DMC com base em suas condições e potencial como um local adequado. Espera-se que esta pesquisa contribua para a divulgação, discussão e promoção desta tendência internacional, com o objetivo de catalisar o posicionamento do México como referência para a América Latina no desenvolvimento de tecnologias I3DMC baseadas em EC para a geração de ViDAS, melhorar a competitividade, a qualidade de vida e o desenvolvimento sustentável de Nuevo León, do México e da região. Consequentemente, as seções seguintes analisam (i) os problemas de habitação no México e no estado de NL, (ii) as condições que definem a habitação digna de acordo com os padrões nacionais e internacionais, comparando o estado atual da habitação no México, (iii) o estado da arte do I3DMC em termos de desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade, a fim de discutir seu potencial de aplicação no México.

## 2. O PROBLEMA DA HABITAÇÃO NO MÉXICO

Tanto a nível mundial como no México, existe um problema habitacional crescente que abrange: (i) déficit habitacional, (ii) habitação informal, (iii) falta de acesso a financiamento ou poder de compra. Segundo o Instituto Nacional de Estatística e Geografia (INEGI), o México apresentou um déficit de 8,2 milhões de moradias em 2021 e 60,6 milhões de pessoas com renda abaixo da linha da previdência social (PIDLB), impossibilitando-lhes o acesso à moradia (INEGI, 2021). Por sua vez, o Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) informou que no país existem 14 milhões de famílias sem meios para comprar ou construir uma casa, situação que se agravou nas últimas três décadas (Instituto de a Habitação, 2021). Da mesma forma, a ONU-Habitat estimou em 2019 que 38,4% da população mexicana vive em habitações inadequadas em termos de materiais de construção, falta de serviços públicos (por exemplo, acesso à rede de água potável), bem como sobrelotação, à qual se refere como deficiências por qualidade e espaços habitacionais (CCEV) (Tecnológico de Monterrey, 2021; ONU-Hábitat, 2019). Estes problemas são atribuídos ao aumento constante da população, que inclui imigrantes de países centro-americanos, bem como ao aumento dos preços da habitação juntamente com o declínio do poder de compra (INEGI, 2023).

Neste sentido, o Inquérito Nacional de Habitação do INEGI em 2020 (Encuesta Nacional de Vivienda del INEGI, 2021) revelou que o maior problema estrutural das habitações são infiltrações (44,2%), fissuras (40,8%), o que leva a um maior consumo de energia de aquecimento e arrefecimento, bem como problemas de saúde. Além disso, a falta de manutenção induz grandes reparos no futuro, causando um impacto ambiental significativo devido ao uso de materiais e energia. O INEGI (2021) destacou que 58,5% de todas as residências no México relataram a necessidade de algum procedimento de reforma para melhorar ou ampliar os espaços; No entanto, a maioria dos programas de subsídios nacionais incentivam a construção de novas habitações (por exemplo, 66% do apoio fornecido pelo CONEVAL foi para a aquisição de novas habitações entre

2013-2018) (Tecnológico de Monterrey, 2021). Vale ressaltar que o Governo do México informou que os problemas habitacionais estão concentrados no sul do país, razão pela qual os subsídios foram aumentados nessas regiões no plano habitacional 2021-2024 (Governo do México, 2023b). Em relação ao impacto ambiental, o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (PNUMA, 2020) informou que a construção comercial e residencial representa 39% das emissões de CO<sub>2</sub> emitidas na atmosfera, a análise incluiu todas as atividades industriais e humanas que consomem energia globalmente. Isto deve-se à construção de novos edifícios e ao funcionamento dos existentes (para aquecimento, iluminação, etc.). Além disso, a IC consome aproximadamente 40% de materiais pétreos (brita, areia, etc.), 25% de madeira, 16% de água, 40% de energia primária e gera 40% dos resíduos de um país (Tabela 1) (Interempresas, 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz et al., 2022).

Dentro de um edifício, estima-se que a construção convencional representa entre 40%-60% da pegada ambiental dependendo do tipo de estrutura, mas em geral, estes processos de construção envolvem a utilização de combustíveis fósseis e uma elevada procura de energia, as quais são as principais fontes de CO<sub>2</sub>, razão pela qual todo o setor tem um forte impacto ambiental. Da mesma forma, estima-se que a construção de moradias residenciais convencionais emite 441-561 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, embora isso varie dependendo das práticas construtivas e dos materiais utilizados (Interempresas, 2020). A Comissão Nacional de Habitação informou que 50% das emissões poluentes pertencem à IC, enquanto a SEMARNAT indicou que em 2021 foram geradas 6,5 milhões de toneladas de resíduos no México, sendo 11% provenientes da IC. Do exposto, concluiu-se que é necessário um maior impulso para a construção de habitação sustentável até que o consumo de recursos naturais seja reduzido em 30%, as emissões de CO<sub>2</sub> em 35%, o consumo de energia em 30%-50% e os custos associados aos resíduos em 50%. -90%, isto dada a estimativa de 7 milhões de habitações que irão gerar 25 milhões de toneladas de gases com efeito estufa até 2050 (Tabela 1) (Senado da República, 2021).

Tabela 1. Análise comparativa para estimar o impacto ambiental da indústria da construção e as metas para sua redução em 2050 para o México ( Interempresas , 2020; PNUMA, 2020; Rosas-Díaz et al., 2022; Senado da República, 2021).

Estimativa do impacto ambiental atual no México		Metas para reduzir o impacto ambiental no México até 2050	
Impacto ambiental	Porcentagem (%)	Impacto ambiental	Porcentagem (%)
Consumo* de materiais pétreos (brita, areia etc.)	40	Redução do consumo de recursos naturais	30
Consumo de madeira*	25	Redução das emissões de CO <sub>2</sub>	35
Consumo de água	16	Redução do consumo de energia	30-50
Consumo de energia primária*	40	Redução de custos associados ao desperdício	50-90
Geração* de resíduos industriais	40		

\*Consumo ou geração em relação ao total disponível no país.

Por outro lado, desde 2012 (Lozano et al., 2022) há um relato de 20 milhões de mexicanos que vivem em habitações sociais com características de sustentabilidade média-baixa, uma vez que mal cumprem os padrões mínimos estabelecidos na regulamentação nacional, com elevados gastos com

habitação e transporte (mais de 40% da renda), fraca integração social e impactos ambientais devido à gestão de águas residuais e à pegada de carbono. Além disso, os promotores habitacionais optam atualmente por desenvolver modelos médios, residenciais e alto padrão, reduzindo o parque de habitação social em mais de 50% entre 2017 e 2022, não sendo esperada qualquer mitigação deste problema no curto prazo que aumenta o custo de habitação comercialmente disponível (El Economista, 2022a).

Em relação às soluções para estes problemas, a arquiteta Tatiana Bilbao apresentou na Bienal de Arquitetura de Chicago em 2015, projetos de habitação familiar flexível de 43 m<sup>2</sup> que podem ser construídos por US\$ 8.000 a US\$ 14.000 dólares, alguns detalhes da construção são: (i) o núcleo desta casa é construída com blocos de concreto e módulos de madeira envolventes, mais leves e baratos, permitindo futuras ampliações; (ii) na sua primeira fase está previsto ter 2 quartos, 1 banheiro e 1 sala de estar/jantar com 5 m de altura, podendo expandir-se para 5 quartos na última fase; (iii) inclui ecotecnologias para maximizar a eficiência energética (ArchDaily, 2015; Housing Institute, 2021). No entanto, a estratégia baseia-se em materiais baratos, como a madeira, que requerem uma manutenção significativa, sendo menos duráveis que o bloco, o tijolo ou o concreto. Por outro lado, existem organizações federais que oferecem apoio econômico (Instituto de la Vivienda, 2021): CONAVI, Fondo Nacional de Habitación Popular (Fondo Nacional de Habitaciones Populares - FONHAPO, subsidia o PIDLB no-derechohabientes, por exemplo: com US\$ 40.000-53.000 para construir ou adquirir habitação, US\$ 15.000-20.000 para expandi-lo ou US\$ 10.000-15.000 para melhorá-lo), Fondo de Vivienda del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (FOVISSSTE, subsidia trabalhadores do ISSSTE), a Sociedade Hipotecaria Federal (Sociedad Hipotecaria Federal - SHF, concede empréstimos hipotecários a não titulares de direitos através de empresas financeiras) e programas de melhoria urbana (buscam melhorar as condições de vida de comunidades e bairros com poucos recursos e altos índices de marginalização e violência, reabilitando espaços públicos e casas que têm posse, mas não segurança jurídica das terras que ocupam, regularizar a habitação para que solicitem outros apoios e serviços públicos). Deve-se notar que, apesar dos esforços acima mencionados, a acessibilidade da habitação no país diminuiu 6,8% de acordo com o relatório do Estado Atual da Habitação no México do SHF, portanto, um equilíbrio de estratégias e resultados indicou que os programas de subsídios têm sido uma resposta favorável, mas eles não garantem o direito à habitação adequada quando sujeitos a um empréstimo hipotecário (Tecnológico de Monterrey, 2021).

Tudo isso enquadra o panorama geral dos problemas habitacionais no México e mostra a necessidade de promover novas estratégias mais sustentáveis que proporcionem uma ViDAS à população no contexto atual, especialmente para o PIDLB, embora sem perder de vista que o setor habitacional é uma das principais atividades econômicas do país, contribuindo com mais de um bilhão de pesos só em 2021 (5,7% do PIB). Além disso, a construção habitacional gerou 2.366.767 empregos (5,8% do total nacional) (INEGI, 2023). Portanto, a construção do ViDAS deve sustentar o papel preponderante da IC no desenvolvimento econômico do país.

## 2.1. Moradia em Nuevo León

No estado dos NL, o INEGI indicou que o número total de lares habitados em 2020 era de 2.037.261 (4,7% do total nacional), dos quais 286.185 (14,05% do total) eram desabitados e 95.820 (0,05% do total) eram de uso temporário (INEGI, 2020; Instituto de Habitación, 2021). Em termos de desnível habitacional, 71.958 residências apresentavam condições de superlotação e outros aspectos que afetam a qualidade de vida dos ocupantes, como deterioração dos materiais, construção com materiais precários (papelão, palma, palha, etc.), piso do terreno, falta de banheiros ou eletricidade, etc. De fato, foram registradas: 398.158 residências com um quarto (19,54% do total, principalmente em Monterrey, Guadalupe e Apodaca), 13.939 com chão de terra

(concentradas em Monterrey, Juárez e General Escobedo) e 41.011 com superlotação (principalmente em García) (General Escobedo y Juárez) (Instituto de Habitación, 2021). Todos os itens acima estão resumidos na Tabela 2.

Em termos de população, em 2022 existiam 5.748.442 habitantes, dos quais 92% viviam nos 18 municípios da área metropolitana, sendo este um fator crucial para o aumento da procura de habitação. NL ficou em 7º lugar a nível nacional em número de habitantes, mas no que diz respeito à composição da população e dos agregados familiares, ficou em 1º lugar no acolhimento de migrantes mexicanos e estrangeiros (113.541 pessoas registadas em 2020), que procuravam melhores oportunidades de emprego. Além disso, 50,4% da população é economicamente ativa, com um salário médio mensal de MXN\$ 8.980 (Governo do México, 2023a; Instituto de la Vivienda, 2021), associando um número significativo de PIDLBs sem renda suficiente para ter a cesta básica e gastos adequados em saúde, vestuário, transporte, educação ou habitação; Da mesma forma, existem pessoas em condições semelhantes que precisam melhorar suas moradias por meio do CCEV, como pisos de terra, paredes e tetos de má qualidade, superlotação, etc. O relatório sobre pobreza do CONEVAL em 2020 mostrou que 1.123.100 habitantes (21,1% da população) são PIDLB em NL, que não têm capacidade para adquirir uma habitação digna nas atuais condições de mercado. Isto traduz-se em 330.323 habitações considerando a média de 3,4 pessoas/família segundo o INEGI (2020). Além disso, existem 162.700 pessoas (3,1% da população) ou 47.853 domicílios com CCEV, que necessitam de apoio urgente para manutenção ou ampliação; isto também está relacionado com o seu rendimento limitado, levando os habitantes a colocarem em primeiro lugar a satisfação de outras necessidades básicas de sobrevivência (INEGI, 2020).

Tabela 2. Situação habitacional em Nuevo León segundo INEGI (2020).

Condição de habitação	Número de casas
Casas habitadas	2.037.261
Casas desabitadas	286.185
Habitação temporária	95.820
Casas com problemas de qualidade e de espaço como deterioração de materiais, utilização de materiais precários, chão em terra batida, falta de instalações sanitárias e de energia eléctrica, superlotação etc.	71.958
Casa de um quarto	398.158
Casa superlotada	41.011

Quanto ao impacto ambiental, o INEGI posicionou NL como um dos seis estados que geram metade dos resíduos do país (4,4% do total) (Milenio, 2018), enquanto a Secretaría de Desarrollo Sustentable (2020) da Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) informou que as atividades de construção contribuem com 10,77% das emissões de PM10 no estado. Da mesma forma, a Faculdade de Arquitetura da UANL informou que a construção de moradias sustentáveis pode influenciar positivamente os custos de construção em série, mostrando economias no consumo de energia e água de 36% e 30% (Paz-Pérez, 2016). Por outro lado, destacou que o número de habitações desabitadas e sem manutenção em NL agravam o impacto ambiental, uma vez que: (i) implicam a exploração de recursos que atualmente não cobrem qualquer necessidade, (ii) degradação prematura e/ou contínua de residências reduz sua vida útil, (iii) o que leva à necessidade de construção de novas moradias, (iv) bem como demolições e geração de resíduos no futuro, (v) gastos desnecessários com manutenções corretivas que superam a manutenção preventiva, etc. Além disso, é surpreendente que a soma de habitações desabitadas e de utilização temporária seja igual às exigidas para o PIDLB e para os CCEV registados em NL, o que sugere a necessidade de

procurar novas soluções para (i) alcançar a acessibilidade de uma habitação digna para o setor mais vulnerável da população e (ii) melhorar as condições para a população menos vulnerável.

Em relação às estratégias estaduais e aos resultados obtidos, temos que: a Cámara Nacional de Desarrollo y Promoción de Vivienda (CANADEVI) indicou em 2022 que 35% das famílias não têm acesso a moradia digna, constatando também uma lacuna de 35% na colocação de habitações, o que esteve associado a fatores como a guerra na Ucrânia, a variação das taxas de juro, o aumento dos fatores de construção e o imposto verde (El Economista, 2022b). Da mesma forma, CANADEVI informou que a meta em 2022 era colocar 40.000-42.000 casas, enquanto a procura de empréstimos era de 62.000, isto em contraste com a colocação média anual de 65.000 casas que ocorreu nos anos anteriores à pandemia de COVID -19. Portanto, houve um déficit de 16 mil habitações, destacando-se que serão necessárias cerca de 20 mil no próximo ano, mas apenas 4 mil foram garantidas. Além disso, a chegada da empresa Tesla ao município Santa Catarina exigirá 13 mil moradias para 35 mil funcionários e seus familiares, segundo a gestão do Instituto de Vivienda de NL (IVNL). Por seu lado, o INFONAVIT em NL anunciou em abril de 2023 que irá distribuir 46.000 empréstimos de habitação (2.000 a mais que em 2022), contando com a inscrição de 30.000 no Registro Único de Vivienda nessa altura (El Economista, 2023).

Foi relatado que as pessoas adquirem empréstimos, mas os seus rendimentos não lhes permitem pagá-los e, embora existam recursos disponíveis no setor bancário, há pouca solicitação de empréstimos porque o produto é muito caro. Na verdade, NL é o segundo estado com maior procura de habitação, apenas depois da Cidade do México (CDMX), apresentando um custo médio de habitação de MXN\$ 4.017.532, que está acima do resto do país, com exceção da CDMX com MXN\$ 8.057.000 (Instituto de la Vivienda, 2021; Tecnológico de Monterrey, 2021). Segundo CANADEVI, 33% das moradias demandadas ultrapassam MXN\$ 300 mil e 35% chegam a MXN\$ 800 mil. Na verdade, o aumento dos preços da habitação também atinge gravemente os jovens que iniciam a vida ativa, uma vez que não conseguem aceder a uma habitação digna, tendo de alugar sem possibilidade de adquirir bens até uma idade madura (na melhor das hipóteses), com uma dívida vitalícia ou apenas conseguindo uma casa na periferia da área urbana que envolve viagens longas e caras, com um enorme impacto na sua qualidade de vida que agrava ainda mais o fosso económico no México.

Assim, o INFONAVIT promoveu taxas de juros entre 3,5% e 5% para 131.000 trabalhadores de baixa renda (El Economista, 2023), com um limite de empréstimo de MXN\$ 2.407.347 para comprar uma casa nova ou existente (o valor do empréstimo concedido dependia da capacidade de remuneração, salário e idade do requerente) (Expansion, 2023). Por outro lado, o Governo de NL propôs um programa de subsídios aos não titulares de direitos através do FOMERREY, para adquirir habitação suficiente, acessível e adequada. Além disso, reduziu o imposto verde para a extracção de recursos pétreos de 1,5 para 0,8, incentivando a diminuição dos preços dos materiais de construção, enquanto os governos municipais irão incentivar a isenção de impostos sobre aquisição de imóveis (impuestos sobre adquisición de inmuebles - ISAI). Da mesma forma, foi solicitado ao INFONAVIT a realização estratégica de novos loteamentos (CentroUrbano , 2023), para os quais CANADEVI promoveu os benefícios da verticalização da habitação, já que 150 pessoas contidas em 25 hectares de terreno podem ter todos os serviços no mesmo local (El Economista , 2022b).

### 3. HABITAÇÃO DIGNA E SEUS CONTRASTES NO MÉXICO

A Constituição Política dos Estados Unidos Mexicanos (art. 4) indica que toda família tem direito a desfrutar de uma moradia digna e decente, o que significa que o Estado tem a obrigação de respeitar, proteger e desenvolver ações que permitam às pessoas ter uma moradia adequada e sua aquisição não deve ser excessiva, comprometendo a satisfação de outras necessidades

(Tecnológico de Monterrey, 2021). Da mesma forma, a ONU declarou a habitação como um direito humano, económico, social e cultural, e deve ser adequada em termos de: segurança de posse, disponibilidade de serviços, habitabilidade, acessibilidade, localização, adequação cultural e acessibilidade. Salientou que o seu custo deve ser acessível a todas as pessoas sem pôr em perigo o gozo de outras necessidades básicas e dos direitos humanos, pelo que uma casa é acessível se as despesas associadas exigirem menos de 30% do rendimento de uma pessoa (ONU-Habitat, 2019). Infelizmente, existe uma lacuna significativa entre estes requisitos e a realidade do México.

Os tipos de habitação no México são (Tecnológico de Monterrey, 2021): (i) Habitação formal, desenvolvida por particulares em terrenos urbanos habitáveis; Tem como característica essencial a propriedade do terreno, é construído com licenças e alvarás, atende aos níveis de habitabilidade (espaço, segurança estrutural, iluminação, ventilação, regulamentos de construção, serviços urbanos básicos de água, drenagem, eletricidade, estradas e acesso a equipamentos urbanos, educação, saúde, comércio, recreação e trabalho). (ii) Habitações informais, desenvolvidas por famílias por meio de autoconstrução e autogestão em terras não urbanizáveis (preservação ecológica, risco natural ou socioorganizacional), sem segurança fundiária, não atendem aos requisitos de habitabilidade. (iii) Habitação rural, construída em ambiente rural de produção agrícola, em terras ejidais comunais com população < 10.000 habitantes, haja segurança fundiária, com níveis mínimos de habitabilidade (segurança estrutural, iluminação, ventilação, podendo carecer de serviços de saúde e energia). (iv) Habitação rural indígena, desenvolvida por famílias por meio de autogestão e autoconstrução comunitária em terra indígena rural comunal ejido, com população < 10.000 habitantes, com características étnicas de usos e costumes, obedecendo aos níveis de habitabilidade tradicionais, sem serviços básicos ou equipamentos urbanos.

Por outro lado, o IVNL (2021) indica que as causas dos problemas habitacionais em NL são: (i) Baixos rendimentos, associando a incapacidade de poupar e realizar a manutenção das casas, levando a um estado precário e sem acesso a qualquer solução. (ii) Habitação temporária (assentamentos irregulares), são pessoas em situação de pobreza sem acesso ao mercado habitacional formal; Acedem ilegalmente a terrenos baratos e autoconstruem-se com materiais perecíveis e pouco resistentes, em zonas de risco e de difícil acesso a serviços básicos, promovendo problemas de saúde e condições inseguras face a desastres naturais, etc. (iii) Processos de autoconstrução insuficientes devido à falta de soluções imediatas de habitação para subsistência, falta de conhecimento ou supervisão adequada. A obra avança de acordo com a disponibilidade de recursos e, pela falta de capacitação para construir, associa problemas de saúde pelo uso de materiais, má distribuição de espaços, cozinhas nos quartos, falta de banheiros, desperdício de materiais, etc. Isso acentua os impactos ambientais. (iv) Baixo nível educacional-cultural, dificultando a inserção bem-sucedida no mercado de trabalho e a mobilidade social. A escolaridade média em NL é de 10,7 anos, mas destaca que o acesso à educação não garante uma aprendizagem de qualidade, limitando as oportunidades do indivíduo.

Da mesma forma, segundo o IVNL (2021), os efeitos dos problemas habitacionais são: (i) A deterioração das habitações por falta de manutenção, agravando danos persistentes (estruturais, umidade, pisos de terra, fissuras nas paredes ou falta de portas e janelas), o que afeta a qualidade de vida. (ii) Maior vulnerabilidade a desastres naturais; as habitações temporárias têm grande probabilidade de serem afetadas, destruídas, sofrerem acidentes ou problemas de integridade. (iii) Casas com risco estrutural, sem serviços ou espaços de qualidade. É o efeito da autoconstrução e assentamento em terrenos remotos ou irregulares, sem preparação para ligação à rede pública de água, drenagem ou eletricidade, tornando o seu fornecimento complicado, perigoso ou ilegal. Além disso, casas irregulares ou abandonadas correm o risco constante de sofrer danos estruturais a qualquer momento, oferecendo pouca proteção externa.

Tudo o que foi dito acima aponta para a necessidade de implementar uma nova abordagem para resolver os problemas habitacionais no México, com o objetivo de alcançar ViDAS. Portanto, na

seção seguinte discutimos o estado da arte do I3DMC em termos de EC e a adequação para alcançar sua aplicação no IC do México, o que inclui a análise das condições para o Estado de Nuevo León como primeiro cenário.

#### **4. IMPRESSÃO 3D DE MISTURAS DE CIMENTO E SEU POTENCIAL DE APLICAÇÃO NO MÉXICO**

Para compreender as vantagens do I3DMC, deve-se notar que na América Latina e no México predominam os métodos convencionais de construção informal e autoconstrução, como o concreto no local, resultando em habitações superprojetadas e de baixa qualidade, uso intensivo de recursos, alta geração de desperdício de materiais, procedimentos precários, armazenamento inadequado, mau planejamento e outras características típicas de países em desenvolvimento (Villagrán-Zaccardi et al., 2022). Portanto, mitigar a autoconstrução é um dos grandes desafios da IC latino-americana para atingir as metas de sustentabilidade, o que envolve estratégias como a substituição do uso de cimento ensacado por (Mendoza-Rangel et al., 2023, Villagrán-Zaccardi et al., 2022): (i) Cimento e argamassa embalados com baixa pegada de carbono e teor de clínquer (fase de cimento que associa maior impacto ambiental na produção de CP). (ii) Concreto e argamassa pré-misturados, bem como estruturas pré-fabricadas de concreto, que permitem otimizar as propriedades e quantidades do material. Porém, associa impacto ambiental ao uso do CP e ao transporte até o canteiro de obras. (iii) O I3DMC, que integra digitalização e automação no processo construtivo através de uma impressora robótica multifuncional operada a partir de um projeto modelado em 3D.

Destaca que o I3DMC oferece vantagens únicas (OSHA, 2022; Robayo-Salazar et al., 2022; Villagrán-Zaccardi et al., 2022): (i) Um potencial ilimitado para a construção e verticalização eficiente de casas, apartamentos, pontes e quartéis em zonas de guerra ativas. (ii) Os projetos têm opções ilimitadas de criatividade, originalidade e complexidade, devido à liberdade do projeto simétrico e assimétrico. Isto permite a otimização estrutural ou arquitetônica, reduzindo a distância entre a engenharia e o projeto, integrando arquitetura bioclimática, ecotecnologias, materiais inteligentes etc. As vantagens acima estão relacionadas à precisão e controle deste processo construtivo. (iii) O IC é o 9º espaço profissional mais perigoso nos EUA, com 21% do total de mortes anuais (OSHA, 2022). O I3DMC reduz a demanda por mão de obra convencional, necessitando de pouco pessoal especializado. Isso também evita problemas por autoconstrução e falta de fiscalização adequada. (iv) O I3DMC minimiza a utilização de escoramentos, uma vez que a colocação de camadas sobre camadas de misturas cimentícias de cura rápida permite que sejam autoportantes, mitigando a utilização de madeira, alumínio ou aço. (v) Permite o projeto de pintura e revestimento de base cimentícia, argamassa e concreto com baixa pegada carbônica, bem como a sua preparação mediante especificação, uma vez que integra um sistema de mistura semelhante ao concreto pré-misturado ou pré-fabricado. Da mesma forma, as tintas podem ser feitas a partir de resíduos industriais e materiais regionais para substituir o CP (por exemplo, por escória, cinza volante, cinza de bagaço de cana, argila calcinada, calcário, cimentos ativados alcalinos, etc.), dependendo das propriedades desejadas (por exemplo, térmicas e isolamento acústico, resistência mecânica, durabilidade, etc.). Vale ressaltar que estão sendo desenvolvidas misturas cimentícias com potencial de captura de CO<sub>2</sub> ambiental, o que poderá ser uma opção interessante no futuro da impressão 3D (Kaliyavaradhan et al., 2020). (vi) O I3DMC simplifica o planejamento da construção e elimina o impacto ambiental do transporte associado ao fornecimento de concreto pronto ou pré-moldado.

Neste contexto, merecem destaque os progressos alcançados pelas empresas I3DMC em todo o mundo. Por exemplo, a empresa chinesa Winsun apresentou os seguintes desempenhos em comparação com a construção convencional (WINSUN, 2014; ArchDaily, 2014): (i) A construção

de 10 casas em 24 horas e um edifício de escritórios em Dubai, reduzindo o custo de construção em 30% tempo. (ii) Economia em custos de construção e mão de obra de 80%. (iii) A redução de desperdícios de 30% a 60% dependendo do tamanho dos elementos impressos. (iv) 50% do concreto utilizado foi proveniente de resíduos de construção. Por sua vez, sendo pioneiros no mundo, os governos dos Emirados Árabes Unidos e de Dubai afirmaram em sua 3D Printing Strategy em 2015 de que 25% de seus prédios sejam impressos até 2025, reduzindo mão de obra em 70% e custos em 90%, enquanto o tempo de construção é 10% daquele utilizado na construção convencional, segundo a Dubai Future Foundation. A iniciativa inclui produtos de impressão para iluminação, fundações, juntas de construção, instalações, parques, edifícios humanitários e habitações móveis (ArchDaily, 2018). Da mesma forma, no que diz respeito à construção modular com I3DMC, em 2021 foi entregue na Holanda a primeira casa de 94 m<sup>2</sup>, composta por 24 elementos impressos na fábrica e transportados para o canteiro de obras, integrando telhados e paredes inclinadas num projecto de arquitectura bioclimática com isolamento térmico e ligação à rede de aquecimento, atingindo um coeficiente de desempenho energético de 0,25 para uma casa altamente confortável e energeticamente eficiente (ArchDaily, 2021a). Vale ressaltar que as propriedades de conforto térmico e acústico podem ser esperadas no I3DMC, devido à customização do projeto e à adaptação das condições ambientais, ao uso de materiais ou sistemas isolantes eficientes, bem como à precisão e consistência da técnica. Na verdade, García-Alvarado et al. (2020) relataram que o IC no Chile está interessado no I3DMC devido ao envolvimento com alta capacidade térmica e de resistência a terremotos em habitações acessíveis. A primeira, devido ao sistema de extrusão em duas paredes paralelas com vazio interno; enquanto o segundo requer um projeto especializado. Em relação à construção em áreas marginalizadas, há um relatório da empresa americana ICON e da organização New Story que em 2019 imprimiram duas casas para famílias do PIDLB em Tabasco. Neste caso, a tinta de concreto conseguiu aproveitar os recursos locais, obtendo um aspecto texturizado e esbranquiçado a partir da impressão 3D (ArchDaily, 2021b).

As vantagens oferecidas pelo I3DMC e os avanços apresentados por esta indústria estiveram relacionados às propriedades físicas, mecânicas, de durabilidade e sustentabilidade que podem ser alcançadas com elementos impressos em 3D. Por exemplo, em comparação com o concreto convencional, o I3DMC conseguiu alcançar um desempenho mecânico e de durabilidade quase isotrópico semelhante ou superior através da utilização de aditivos e misturas de alto desempenho, funcionando de maneira homogênea e evitando pontos fracos nas juntas entre camadas (CEMEX, 2022; Ma et al., 2019; MARQ, 2021; Murcia et al., 2020; Ye et al., 2021). A Tabela 3 mostra alguns exemplos comparativos de propriedades mecânicas. Destaca-se que a nível industrial se conseguiu uma resistência semelhante entre os elementos impressos em 3D e os fabricados na construção convencional, mas as empresas devem desenvolver as suas próprias tintas utilizando materiais cimentícios, agregados e aditivos químicos regionais, considerando as condições ambientais devido a que atualmente não existem normas internacionais que regulamentem a sua fabricação e, portanto, a avaliação do desempenho dos elementos I3DMC tem sido realizada com base na igualdade das propriedades padronizadas para o concreto convencional ou no desenvolvimento de regulamentações locais (Be more 3D, 2024). Além do desenvolvimento de regulamentações, outro desafio importante no desenvolvimento do I3DMC é a incorporação de diferentes tipos de materiais (por exemplo, resíduos industriais, geopolímeros, solos e argilas, etc.) para produzir pintura e revestimento de base cimentícia que atinjam simultaneamente o nível das propriedades reológicas ideais para impressão 3D e desempenho mecânico no estado endurecido (Ahmed, 2023; Song e Li, 2021).

Tabela 3. Comparação das propriedades mecânicas do concreto convencional e impresso em 3D.

Propriedade	Material de construção	
	concreto convencional	Concreto impresso em 3D
Porosidade (Rahul et al., 2019)	9-11%	7%, a melhoria deveu-se à maior compactação e empacotamento devido ao processo de extrusão. 11% nas interfaces devido a irregularidades nos filamentos.
Resistência à ligação ao cisalhamento direto (Rahul et al., 2019; Ye et al., 2021)	7-8 MPa.	Diminuiu de 22-29% nas camadas verticais e 24% nas camadas horizontais, o que foi associado ao tempo de deposição entre camadas.
Resistência à compressão (Baz et al., 2020; Liu et al., 2021; Özalp e Yilmaz, 2020; Rahul et al., 2019; Ye et al., 2021)	38-75MPa.	Diminuiu de 13-21% nas três direções devido à porosidade nas interfaces das camadas; os resultados são semelhantes em testes Pull Out. Mas aumentou de 3 a 18% reforçando com fibra ou otimizando parâmetros de impressão.
Resistência à flexão (Arunothayan et al., 2020; Joh et al., 2020; Rahul et al., 2019; Ye et al., 2021)	8,5-15,1MPa.	Diminuiu de 33-40% na direção paralela à junção da camada, mas aumentou de 18-19% na direção perpendicular; o acima foi associado à porosidade. O reforço com fibra dá resultados semelhantes.
Resistência à tração (Wolfs et al., 2019)	~4MPa.	Redução de aproximadamente 10% independentemente da direção. Quanto maior o tempo de deposição entre camadas, menor será a resistência.

Em relação à durabilidade das tintas e das impressoras 3D, ambas apresentam manutenção mínima a longo prazo se (Jo et al., 2020; Nohedi et al., 2022): (i) a tinta for otimizada para atingir a menor quantidade de juntas e uniões, reduzindo vazamentos de água ou ar; (ii) a impressora 3D recebe limpeza contínua para evitar o endurecimento das tintas nos sistemas de extrusão e bombeamento. Especificamente, os elementos I3DMC apresentam resultados de durabilidade variáveis em relação à construção convencional (Tabela 4), que reside na otimização do estudo de dosagem e dos parâmetros de impressão para alcançar a densificação necessária no elemento impresso em 3D evitando a penetração de cloretos, sulfatos e outros agentes de deterioração (Natives3D, 2018; Nohedi et al., 2022; Rehman et al., 2021; Xiao et al., 2021).

Portanto, otimizar o processo de extrusão é fundamental porque modifica a morfologia dos poros e a compactação do elemento impresso em 3D para limitar a entrada de agentes agressivos (El Inaty et al., 2022). Por outro lado, a precisão e consistência do I3DMC contribuem para o controle de qualidade, reduzindo a variabilidade das propriedades de durabilidade. No entanto, também é possível utilizar materiais avançados para reduzir problemas estruturais ou de durabilidade, por exemplo, se for necessário reforço no elemento impresso em 3D, é possível introduzir varetas, fios ou fibras de aço, basalto, polipropileno, etc. (Ding et al., 2020; El Inaty et al., 2022; Robayo-Salazar et al., 2023; Sikora et al., 2022; Song e Li, 2021; Zhang et al., 2021). Vale ressaltar que ainda está em andamento a pesquisa de elementos impressos em 3D para diferentes condições de exposição e agentes agressivos, que devem ser adaptados às regiões do país, avaliados por longos períodos de tempo e buscando a otimização das propriedades de durabilidade utilizando materiais locais. (Mendoza-Rangel e Díaz-Aguilera, 2023; Song e Li, 2021).

Tabela 4. Comparação de durabilidade entre concreto convencional e impresso em 3D.

Propriedade ou exposição	Material de construção	
	concreto convencional	Concreto impresso em 3D
Cloretos (Van Der Putten et al., 2020)	A área de entrada e penetração de cloretos por 7 a 35 dias foi de 10 a 15% e 18 a 20%, respectivamente.	A área de entrada e penetração de cloretos por 7 a 35 dias foi de 30 a 48% e 30 a 50%, respectivamente. Um tempo de impressão mais longo aumentou a porosidade e a entrada de cloretos.
Tempo de contração devido à evaporação da água (Mohelich et al., 2020)	3-6 horas .	1,2-2 horas , a diminuição foi associada a uma maior porosidade na interface das camadas.
Altas temperaturas (240°C) (Cicione et al., 2021)	Conteúdo de ar de 6%. Resistência à flexão e compressão de 6 e 58 MPa, respectivamente.	Conteúdo de ar de 5,1%. Resistência à flexão e compressão de 5 e 68 MPa, respectivamente. A melhoria esteve associada à maior porosidade que atenuou o desprendimento devido à ação das pressões hidrotermais internas.
Ácido sulfúrico (El Inaty et al., 2022)	Perda de massa de 1% (84 dias) e 3,5% (140 dias). A resistência à compressão e à flexão diminuiu de 69 para 44 MPa (36%) e de 13 para 11 MPa (15%), respectivamente.	Perda de massa de 0,8% (84 dias) e 4% (140 dias). A resistência à compressão e flexão diminuiu de 30 para 27 MPa (10%) e de 12 para 11 MPa (8%). Melhor desempenho foi associado a menor porosidade.

No que diz respeito ao impacto ambiental e à sustentabilidade dos elementos I3DMC em comparação com o concreto convencional (Figura 1), foram relatadas reduções nas (i) emissões de CO<sub>2</sub> de 12%-88%, (ii) no impacto ambiental associado com areia e aço 20%-50%, (iii) consumo de energia de 86-87%, (iv) energia incorporada de 12%-55%, (v) potencial de aquecimento global de 55%-77%, (vi) a toxicidade do meio ambiente de 4%-53%; bem como (vii) um aumento na produtividade de 47-48,1% (Motalebi et al., 2023). Outros aspectos da sustentabilidade são comparados na Tabela 5. É interessante mencionar que estes resultados foram associados ao uso de cimento Portland comum (cimento Portland comum - CPC), e poderiam ser melhorados de forma interessante usando pinturas e revestimentos de base cimentícia alternativas desenvolvidas para impressão 3D em Nuevo León, México, como metacaulim alcalino ativado (MC) com altas quantidades de calcário pulverizado (PC) (até 80%), que foram desenvolvidos considerando critérios de Projeto Eficiente de EC como o uso de MC de pureza média-alta, otimizando a rota de transformação do caulim- metacaulim que tempo de calcinação minimizado, desenvolvimento de metodologias de projeto e otimização da composição química para maximizar propriedades mecânicas, durabilidade e sustentabilidade, etc. (Díaz-Aguilera, 2024). Recentemente, esses materiais cimentícios foram validados para uso em impressão 3D, obtendo resultados satisfatórios sem a necessidade do uso de aditivos químicos (Perales- Santillan et al., 2024). Os resultados preliminares mostraram que apenas a pintura e revestimento de base cimentícia apresentou uma redução de 77,5% nas emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao processo de fabricação em

relação ao CPO (Díaz-Aguilera, 2024), o que deve ser somado à contribuição do processo de construção por impressão 3D. Vale ressaltar que essa mistura otimizada com 80% de PC superou o CPO em 228,5 unidades de projeto eficiente (unidades de diseño eficiente - ude), conforme proposta de indicador da EC que considerou desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade; enquanto uma mistura otimizada com 30% de PC superou em 1147,2 ude (Díaz-Aguilera, 2024). Além disso, outro estudo desses materiais cimentícios otimizados utilizando MC de alta pureza mostrou uma redução de 42,6% no custo de produção em comparação com um cimento Portland compósito (CPC) (Perez -Cortes e Escalante- Garcia , 2020). O acima exposto é um exemplo de pinturas e revestimentos de base cimentícia em desenvolvimento em Nuevo León, México (UANL-FIC, 2023), o que sugere que as tecnologias I3DMC podem ser ainda mais eficientes em combinação com outros desenvolvimentos mexicanos.

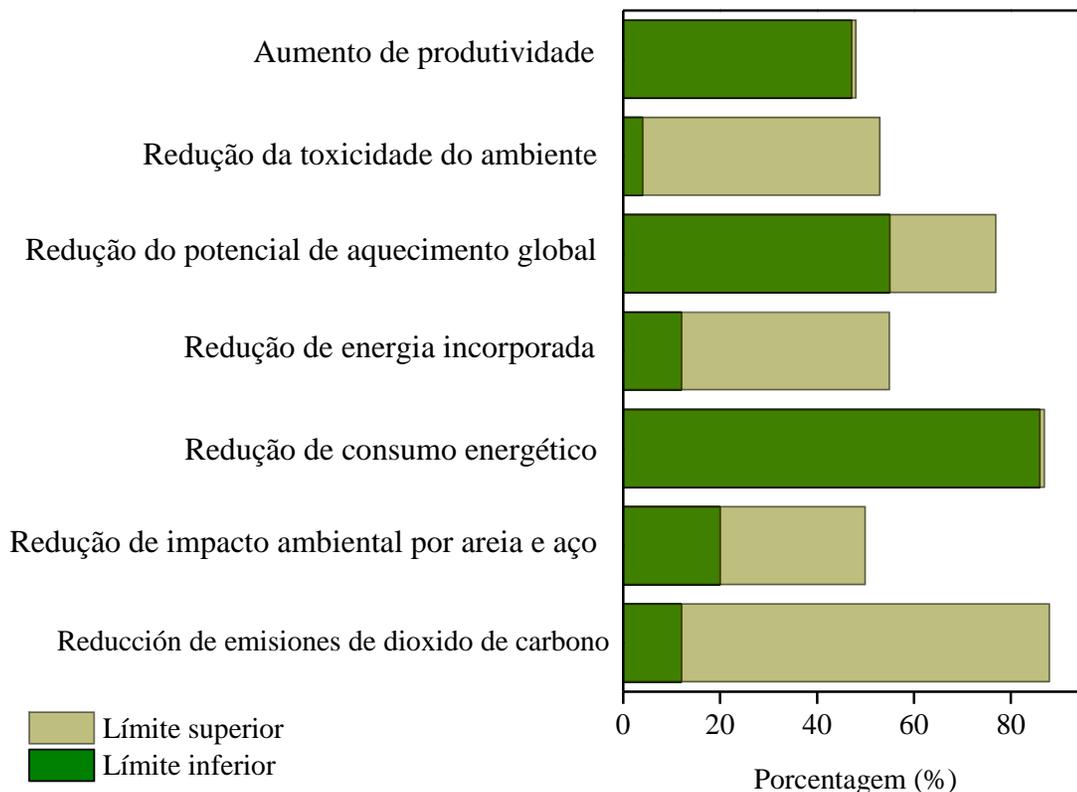


Figura 1. Vantagens nos aspectos de impacto ambiental da impressão 3D de materiais cimentícios em relação ao concreto convencional (adaptado de Motalebi et al., 2023).

Da mesma forma, o impacto na economia e nas condições de trabalho deve ser considerado na análise da sustentabilidade do I3DMC. Inicialmente, não seria esperado o uso em massa do I3DMC no México, o que reduziria drasticamente a contratação de pessoal de construção. Isto é considerado uma desvantagem do I3DMC, embora também sugira a necessidade de uma atualização no IC através da formação especializada de pessoal (Amhed, 2023; De Schutter et al., 2018). No entanto, as múltiplas vantagens do I3DMC fazem dele uma das tecnologias mais sustentáveis e rentáveis de explorar, como confirma o crescimento exponencial do investimento nesta tecnologia que se vive atualmente, o que se reflete no número de empresas que já operam em países desenvolvidos como EUA, China, Emirados Árabes Unidos, Canadá, Japão e Espanha (ArchDaily, 2018; Be more 3D, 2024; Motalebi et al., 2023; Winsun, 2014). De fato, a empresa CEMEX (2022), em colaboração com a impressora internacional COBOD, anunciou em setembro de 2023 a introdução da primeira impressora 3D de concreto no México para inovar no

desenvolvimento de tintas feitas de concreto, o que mostra o interesse em introduzir a tecnologia I3DMC no mercado mexicano. Vale ressaltar que adquirir e colocar em operação uma impressora COBOD (2023) custa cerca de US\$ 400.000 a US\$ 1.000.000 de dólares, tornando seu acesso relativamente difícil em países em desenvolvimento. Tudo isto significa que a tecnologia I3DMC está a ser intensamente pesquisada em todo o mundo para a introduzir progressivamente nos mercados e a chave está no desenvolvimento de impressoras 3D funcionais, robustas e duráveis, bem como pinturas e revestimentos de base cimentícia com capacidade de impressão, resistência mecânica, durabilidade e baixo impacto ambiental (Robayo-Salazar et al., 2023).

Tabela 5. Comparação em aspectos de sustentabilidade para concreto convencional e impresso em 3D.

Aspecto de sustentabilidade	Material de construção	
	Alvenaria e concreto convencional (moldado no local)	Concreto impresso em 3D
Redução do desperdício de materiais ( Buswell et al., 2007; Nematollahi et al., 2017; Sanjayan et al. 2019)	Pode gerar mais desperdício em projetos que necessitam de correções devido a interrupções ou erros humanos.	Permite uma redução significativa de desperdícios devido à precisão da automatização do processo, minimizando cortes.
Uso de materiais sustentáveis (Ding et al., 2020; Li et al., 2024; Xiao et al., 2021)	Normalmente utiliza materiais convencionais com maior impacto ambiental devido à extração de matérias-primas e ao processo de fabricação. Depende fortemente de materiais disponíveis localmente, que podem não ser sustentáveis.	É possível utilizar materiais de construção mais sustentáveis devido ao projeto das pinturas e revestimentos de base cimentícia (por exemplo, concreto reforçado com fibras naturais, materiais reciclados, etc.).
Eficiência energética (Abdalla et al., 2021; Alkhalidi et al., 2020; He et al., 2020)	Requer medidas adicionais para melhorar a eficiência energética, como a instalação de isolamento após a construção. As juntas de construção podem representar pontos de fuga de energia se não forem devidamente vedadas.	A capacidade de integrar isolamento térmico e outros recursos melhora a eficiência energética da casa. A redução das juntas de construção pode diminuir os pontos de fuga de energia.
Durabilidade e manutenção (Ahmed et al., 2023; de Souza et al., 2024; Schuldt et al., 2021)	A durabilidade depende da qualidade do concreto associado à obra. Pode exigir manutenção regular para reparar fissuras e evitar deterioração.	Pode ser mais durável e exigir menos manutenção a longo prazo devido à uniformidade e resistência do material. Menor risco de deterioração por corrosão devido ao uso de materiais não metálicos.
Pegada de carbono (De Schutter et al., 2018; Khan et al., 2021; Mohan et al., 2022)	Pode ser maior devido à quantidade de energia necessária para fabricar concreto e transportar materiais. Requer equipamentos com alto consumo de combustíveis fósseis.	Pode ser menor em comparação com a construção convencional devido à redução de energia, desperdício e materiais.

Outro aspecto de interesse relacionado à sustentabilidade do I3DMC é o custo de construção habitacional, portanto, foi realizada uma análise comparativa de custo/m<sup>2</sup> entre a construção convencional e o I3DMC (Tabela 6), considerando que: (i) o custo médio da habitação convencional no México de 2019 a 2024 aumentou de \$5.777,5-\$6.213/m<sup>2</sup> para \$6.896,55-\$9.266/m<sup>2</sup>, enquanto o custo direto da habitação social aumentou 2,07% de março de 2023 a março de 2024 (CMIC-CEICO, 2023; GAMA Arquitectura, 2024; GRUPO QVICK, 2023; (ii) Kreiger et al. (2019) estimaram que a construção de habitações impressas em 3D alcançou uma redução de custos de 10-25% ou 25-37% em comparação com o uso de alvenaria convencional ou concreto, respectivamente; Da mesma forma, em 2023 estimou-se que a redução de custos em relação à construção convencional atingiu 50% na Índia, enquanto o custo médio na Rússia atingiu MXN\$ 4.770/m<sup>2</sup>; Por outro lado, em 2018, a empresa ICON imprimiu casas de 60 m<sup>2</sup> por um custo médio de MXN\$ 2.800/m<sup>2</sup> em Austin, propondo reduzi-lo para MXN\$ 1.200/m<sup>2</sup> no El Salvador (EnteUrbano, 2020; Forbes México, 2018; Kreiger Vijayalaxmi et al., 2023). Assim, para um estrato socioeconômico médio e baixo, pode-se estimar que o custo no México poderia ser reduzido de MXN\$ 6.000 a MXN\$ 9.000/m<sup>2</sup> para MXN\$ 1.700 a MXN\$ 4.500/m<sup>2</sup>, envolvendo adicionalmente a redução de resíduos no local, flexibilidade de projeto e menos tempo de construção. Vale ressaltar que a composição geral da relação lucro/custo das construções gira em torno de 2/1-3/1 e pode-se constatar que 50% do custo da construção é para mão de obra e 50% para materiais.

Tabela 6. Comparação de custo/m<sup>2</sup> de construção convencional e impressão 3D para o México.

<b>produtos</b>	<b>Preço por m<sup>2</sup> de construção (MXN)</b>	<b>Características</b>	<b>População beneficiada</b>
Habitação de construção convencional (modular)	\$ 6.000 – \$ 9.000	Eles têm garantia para o primeiro ano. Características isolantes. Projetos pré-estabelecidos. Alto custo para a população em situação de pobreza e pobreza extrema	Classe baixa e média, indivíduos ou casais com/sem filhos
Carcaça de concreto impressa em 3D	US\$ 1.700 – US\$ 4.500	Redução de resíduos no local. Layouts flexíveis. Menor custo de mão de obra. Menos tempo de construção.	

Uma segunda análise pode ser realizada considerando que a atuação das tecnologias I3DMC permite (i) a construção de moradias garantindo a qualidade dos materiais e durabilidade, bem como a segurança estrutural dos materiais, mesmo diante de desastres naturais, (ii) influenciar positivamente nos créditos e apoios independentemente da sua natureza, isto pela redução dos custos de habitação, bem como (iii) proporcionar as características de habitabilidade estipuladas pelo ONU-Habitat (2019) e pelo IVNL (2021), aproximando especialmente a meta de 30% do rendimento determinada para habitação a preços acessíveis (ONU-Habitat, 2019). Assim, seria possível financiar um custo de 8 mil a 14 mil dólares em 5 a 8 anos (ArchDaily, 2015) ao considerar como exemplo a renda média em NL (Governo do México, 2023a) e o custo do projeto da Arquiteta Tatiana Bilbao, porém, seu projeto foi pensado para construção convencional, portanto utilizar o I3DMC significaria uma melhoria na resistência, durabilidade, sustentabilidade, custos, etc. Desta forma, a construção de habitação pelo I3DMC promove pelas suas características o alcance do ViDAS de uma forma que não tinha sido anteriormente proposta no IC, ao contrário de diversificar os apoios aos candidatos, mas não aborda o problema central da atual casa: seu custo. Isto proporcionaria acesso ao ViDAS ao setor vulnerável da população, mas também sugere a

obtenção de níveis mais elevados de sustentabilidade para a população com rendimentos mais elevados, uma vez que, ao custo da habitação comercial convencional, poderiam ser adicionadas tecnologias de alta eficiência energética, revestimentos e cimentos autocicatrizantes ou fotocatalíticos para captura de CO<sub>2</sub>, janelas inteligentes, painéis solares e aquecedores, projetos bioclimáticos usando geometrias complexas, etc. No entanto, há necessidade de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia mexicana em termos de pinturas e revestimentos de base cimentícia e impressoras 3D baseadas nos critérios de projeto eficiente de EC, disponibilizando estas tecnologias à população e aos promotores habitacionais de uma forma mais acessível no nosso país.

#### **4.1. Análise da circularidade do ViDAS impresso em 3D: cenário possível para o México**

Em prol do desenvolvimento sustentável do país e baseada na tecnologia mexicana, a construção com o I3DMC promove uma drástica redução de custos, o que seria suficiente para fornecer ViDAS ao PIDLB. Isso poderia reduzir significativamente os problemas socioambientais com estratégias como: (i) aproveitar os subsídios atuais para adquirir-melhorar-ampliar uma casa, facilitando o acesso ao financiamento e evitando a inadimplência de valores menores, que seriam mais proporcionais à renda das PIDLB. Isto reduz os prazos de financiamento e, acima de tudo, permite respeitar o limite de 30% do rendimento estabelecido pela ONU-Habitat (2019) que determina a habitação acessível, bem como resolver os CCEVs, o que por outro lado apoia a satisfação do cliente no resto das necessidades básicas. (ii) A eficiência do processo de construção do I3DMC resulta na rápida geração de habitação a preços acessíveis, permitindo a redução do déficit habitacional, mesmo com elevada procura. Isto também promove um melhor planejamento urbano que consegue a colocação e evita habitações vagas construídas com I3DMC. (iii) O acesso das PIDLB ao mercado ViDAS mitiga o problema da habitação informal (por exemplo, autoconstrução, falta de manutenção, precariedade, crescimento urbano descontrolado, pouca integração social, assentamento em áreas de preservação ecológica, vulnerabilidade a fenômenos naturais, risco estrutural, pouca proteção externa, etc.), devido ao cumprimento dos requisitos para uma casa digna e decente de acordo com a ONU-Habitat e a Constituição Mexicana, ou seja, casas construídas com materiais duráveis, resistentes e de qualidade nos pisos, paredes e tetos do I3DMC, utilizando um projeto energeticamente eficiente, estrutural e arquitetônico que otimiza os espaços, a sua funcionalidade, o consumo de energia, o conforto e a utilização dos recursos habitacionais, cumprindo as licenças e regulamentos de construção do terreno, realizada sob supervisão especializada em I3DMC, garantindo o acesso aos serviços públicos e reduzindo a superlotação e o atraso habitacional. (iv) Da mesma forma, pode fornecer soluções para os problemas de melhoria e expansão de habitações, habitações temporárias, bem como de espaços públicos em comunidades e bairros. Ressalta-se que os elementos impressos apresentam melhores propriedades em relação ao bloco, tijolo ou madeira, por isso minimizam a necessidade de manutenção, prolongando a vida útil, por isso podem melhorar outras propostas de habitação acessível como a de Tatiana Bilbao. (ArchDaily, 2015). (v) Tudo o que foi dito acima melhora a qualidade de vida e a saúde dos habitantes, ao mesmo tempo que reduz o impacto ambiental da IC, poderia atingir os objetivos de sustentabilidade, mantendo ao mesmo tempo o seu papel de liderança no país em termos económicos. Além disso, deverão ser criadas alianças estratégicas e políticas públicas para facilitar a aquisição de ViDAS impressos em 3D, principalmente para o PIDLB.

Em termos dos ODS (Nações Unidas, 2015), o I3DMC afeta reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub>, a procura de energia, a geração de resíduos, o uso intensivo de recursos naturais, e aumentando a reutilização de subprodutos e recursos locais, isto de acordo com o desenvolvimento de processos e tecnologias mais eficientes: (i) O I3DMC permite a utilização eficiente de materiais de construção, dosando e depositando quantidades precisas de água, cimento, aditivos, agregados pétreos, etc. Isto reduz a extração, os resíduos de construção, bem como as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de materiais, o que indiretamente também promove um custo acessível de

ViDAS. Da mesma forma, a ocupação de ViDAS evita assentamentos irregulares em áreas protegidas, promovendo o crescimento controlado das cidades. O acima exposto afeta o ODS-6 de água potável e saneamento, o ODS-7 de energia acessível e não poluente, bem como o ODS-15 de vida nos ecossistemas terrestres. (ii) Uma vez que a eficiência e o impacto ambiental são otimizados através da digitalização e automação de um robô multifuncional, e a construção modular é promovida, o ODS-9 sobre indústria, inovação e infraestrutura e o ODS-12 sobre produção e consumo responsáveis são impactados. (iii) A construção de cidades por impressão 3D mitiga as alterações climáticas devido a práticas de baixo impacto ambiental, projeto eficiente, bioclimático e sustentável, extensão da durabilidade, otimização de recursos, etc. Além disso, requer alianças estratégicas entre os setores público e privado para alcançar os ODS, o desenvolvimento de pesquisas e novas tecnologias mexicanas para a construção de ViDAS. Isto afeta o ODS-11 de cidades e comunidades sustentáveis, o ODS 13 de ação climática e o ODS-17 de alianças para alcançar os ODS. (iv) Outros benefícios do I3DMC estão relacionados com: ODS-3 de saúde e bem-estar, melhorando a qualidade de vida das pessoas; ODS-8 de trabalho digno e crescimento econômico, através da criação de novas oportunidades econômicas, empresas e modelos de negócio sustentáveis; ODS-4 de educação de qualidade, porque o desenvolvimento tecnológico do I3DMC permite aos alunos aprenderem simultaneamente projeto, ciência, engenharia e processos de fabricação de forma prática.

## 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento sustentável do México através da aplicação da Economia Circular na Indústria da Construção proporciona soluções como a impressão 3D de misturas cimentícias, que proporcionariam habitação digna, acessível e sustentável à população em geral, cumprindo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas e o Governo Federal. Isto deve-se às diversas vantagens associadas à automatização do processo construtivo com recurso a um robô, destacando-se (i) a redução de mão-de-obra, acidentes e erros humanos, (ii) a otimização na utilização de materiais e controlo de qualidade das propriedades devido à precisão durante o procedimento de mistura, bombeamento e impressão das misturas cimentícias, bem como (iii) ao elevado desempenho construtivo, que reduz os tempos de construção e permite a construção modular através de peças pré-fabricadas impressas em 3D. O acima exposto implica uma redução significativa no impacto ambiental e nos custos (de MXN\$ 6.000-MXN\$ 9.000/m<sup>2</sup> para MXN\$ 1.700-MXN\$ 4.500/m<sup>2</sup>) em relação à construção convencional de acordo com as estimativas atuais, mas superando em qualidade devido ao desempenho mecânico e durabilidade a outras propostas sustentáveis já existentes ou igualando o desempenho do concreto convencional, otimizando adequadamente as propriedades dos elementos impressos em 3D. No entanto, é possível obter vantagens superiores utilizando (i) tecnologias alternativas mexicanas de cimento ou resíduos de tintas, (ii) além de implementar, pelo mesmo custo das habitações comerciais convencionais, tecnologias avançadas de alta eficiência energética, captura de CO<sub>2</sub>, ecotecnologias, projetos arquitetônicos bioclimáticos, etc. Espera-se que este trabalho contribua para a divulgação e discussão de soluções nacionais para a integração da (i) economia circular na indústria da construção, (ii) alcançar uma habitação digna, acessível e sustentável, bem como (iii) o desenvolvimento da tecnologia mexicana para impressoras 3D e pinturas e revestimentos de base cimentícia, dando origem a empresas de base tecnológica nesta área.

## 6. AGRADECIMENTOS

JH Díaz-Aguilera, JR Zapata-Padilla, S. Mares-Chávez, FD Anguiano-Pérez, MI Velásquez-Hernández, EE Espino-Robles, JI Alvarado-López e JA Mendoza-Jiménez agradecem à CONAHCYT pelas bolsas concedidas para o CVU 929098, 946425, 1346629, 554927, 1041129, 1305949, 994896 e 591308, respectivamente.

## 8. REFERÊNCIAS

- 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*. Acessado 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*. Acessado 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*. Acessado 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*. Acessado 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](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](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*. Acessado 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](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-Gener-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](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](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](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](https://pbr-sed.nl.gob.mx/sites/default/files/diagnostico_ivnl.pdf)

- Interempresas (2020), *Arquitectura y construcción*. Consultado 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*. Consultado el 25 de septiembre de 2023 en: [https://revistaeypp.flacso.org.ar/files/revistas/1667932268\\_143-171.pdf](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*. Consultado 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*. Consultado 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](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*. Acessado 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>