Recibido:09/08/2025 Aprobado:10/09/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n3.223

Avances en hormigón impreso en 3d: estado del arte y desafíos para la construcción modular

Walter David Cobeña Loor
wdcobena@sangregorio.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-8123-8496
Universidad Particular San Gregorio de Portoviejo
Ecuador-Portoviejo

Jordy Alejandro Zambrano Vera
jordyzave@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0007-6681-1956
Universidad San Gregorio de Portoviejo
Ecuador-Portoviejo

Jhon Gabriel Mendoza-Cantos
jgmendozac@sangregorio.edu.ec
http://orcid.org/0000-0002-7677-7110
Universidad Particular San Gregorio de Portoviejo
Ecuador-Portoviejo

Jefferson Alexander Rodríguez Delgado
jrodriguezde@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0004-9764-8643
Universidad San Gregorio de Portoviejo
Ecuador-Portoviejo

John Jairo Molina Moreira
jmolina@sangregorio.edu.ec
https://orcid.org/0009-0001-1374-061X
Universidad San Gregorio de Portoviejo
Ecuador-Portoviejo

Luis Felipe Bacusoy Tumbaco
lbacusoy65@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-6159-9115
Universidad Técnica de Manabí
Ecuador-Portoviejo

RESUMEN

La impresión 3D de hormigón (3DCP) está revolucionando la construcción modular al reducir tiempos de ejecución, minimizar desperdicios y permitir geometrías optimizadas, aunque persisten retos en desempeño estructural, control de procesos y estandarización. Objetivo: sintetizar el estado del arte de 3DCP aplicado a construcción modular, identificando avances en materiales, procesos y desempeño, así como brechas y desafíos de implementación. Métodos: revisión sistemática conforme a PRISMA 2020, con criterios de elegibilidad predefinidos, búsquedas en ScienceDirect y MDPI (2019–2025), en inglés y español. Se incluyeron estudios revisados por pares con datos experimentales o prototipos a escala y se excluyeron editoriales y preprints no revisados. La síntesis narrativa se complementó con meta-análisis de efectos aleatorios y análisis por subgrupos según mezcla, plataforma y escala. Resultados: el control reológico (límite de fluencia y tixotropía) y la adhesión inter-capa son determinantes para la resistencia y estabilidad. Las adiciones minerales y fibras mejoran la buildability y la posfisuración, aunque pueden comprometer la extruibilidad. Se destacan avances en refuerzo híbrido, anclajes embebidos y estrategias de impresión que favorecen la modularización, con mejoras en productividad y reducción de residuos. Persisten variabilidades en tolerancias geométricas y propiedades a escala real, así como heterogeneidad metodológica que dificulta la transferencia a códigos. Conclusiones: el 3DCP muestra madurez creciente para elementos modulares; se requieren protocolos de control de calidad, estandarización de ensayos y evidencia robusta de durabilidad para su adopción industrial.

Palabras clave: hormigón impreso en 3D, construcción modular, reología, unión inter-capa, refuerzo híbrido

Advances in 3d-printed concrete: state of the art and challenges for modular construction

ABSTRACT

3D concrete printing (3DCP) is revolutionizing modular construction by reducing execution times, minimizing waste, and enabling optimized geometries, although challenges remain regarding structural performance, process control, and standardization. Objective: to synthesize the state of the art of 3DCP applied to modular construction, identifying advances in materials, processes, and performance, as well as gaps and implementation challenges. Methods: a systematic review was conducted following PRISMA 2020 guidelines, with predefined eligibility criteria and searches in ScienceDirect and MDPI (2019–2025), in both English and Spanish. Peer-reviewed studies reporting experimental data or full-scale prototypes were included, while editorials and non-peer-reviewed preprints were excluded. Narrative synthesis was complemented by random-effects meta-analysis and subgroup analyses by mix type, platform, and scale. Results: rheological control (yield stress and thixotropy) and interlayer bonding were found to be key determinants of strength and stability. Mineral additions and fibers improve buildability and post-cracking behavior, although they may compromise extrudability. Advances in hybrid reinforcement, embedded anchors, and printing strategies support modularization, yielding productivity gains and waste reduction. However, variability in geometric tolerances and full-scale properties, along with methodological heterogeneity, limits comparability and code integration. Conclusions: 3DCP shows increasing maturity for modular structural and enclosure elements; real-time quality control protocols, standardized testing procedures, and robust evidence on durability are required to enable large-scale industrial adoption.

Keywords: 3D-printed concrete, modular construction, rheology, interlayer bonding, hybrid reinforcement

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D de concreto (3DCP) se ha consolidado como una de las innovaciones más disruptivas en la construcción, ofreciendo posibilidades para transformar el diseño, fabricación y montaje de edificaciones modulares. Su relevancia radica en la capacidad de reducir tiempos de ejecución, minimizar desperdicios y optimizar recursos en un sector que representa cerca del 40 % de las emisiones globales de CO_2 (Bazli et al., 2023). La combinación de automatización, modelado paramétrico y materiales de alto desempeño posiciona al 3DCP como un pilar para la construcción sostenible, capaz de responder a la creciente demanda de viviendas y de infraestructura resiliente en entornos urbanos y remotos (Shufrin et al., 2023; Volpe et al., 2021).

Pese al crecimiento de la investigación en 3DCP, persisten desafíos técnicos y metodológicos que limitan su implementación a gran escala en construcción modular. Se evidencian brechas en la caracterización de materiales, en la estandarización de procesos de extrusión y en la evaluación del desempeño estructural y ambiental de los sistemas constructivos (Cavalcante et al., 2025; Ding et al., 2025). La falta de normativas específicas y de protocolos de control de calidad para garantizar la resistencia interlaminar y la durabilidad de las edificaciones impresas genera incertidumbre en su uso masivo (Lee et al., 2024; Maroszek et al., 2025). Por ello, resulta fundamental sintetizar el estado del arte para identificar avances, limitaciones y áreas prioritarias de investigación.

Estudios recientes han abordado el desarrollo de mezclas optimizadas para 3DCP, explorando cementos suplementarios, geopolímeros y el uso de agregados reciclados para mejorar sostenibilidad y reducir huella de carbono (Roux et al., 2024; Skibicki et al., 2024; Pepe et al., 2025). En el ámbito reológico, se han propuesto modelos constitutivos y criterios de imprimibilidad que relacionan el esfuerzo de cedencia, la viscosidad plástica y la tixotropía con la extrudabilidad y buildability, permitiendo predecir deformaciones y optimizar el diseño de mezcla (Lian et al., 2025; Jeong et al., 2019). Investigaciones han evidenciado la influencia del tiempo entre capas y del contenido de nanoaditivos en la cohesión interlaminar, confirmando

que intervalos prolongados reducen la resistencia de unión hasta en un 40 % (Pan et al., 2021; Maroszek et al., 2025).

Desde la perspectiva de procesos, se han estudiado mejoras en trayectorias de impresión, control en línea de parámetros y refuerzo continuo para superar la debilidad interlaminar y aumentar la capacidad de carga de los elementos impresos (Jacquet & Perrot, 2023; Wu et al., 2024). Asimismo, se han propuesto estrategias de diseño para estructuras dominadas por compresión, segmentación modular y ensamblaje en seco, que reducen la necesidad de encofrados y aceleran el montaje (Lin et al., 2022; Yabanigül & Gulec, 2025). En cuanto al desempeño, estudios numéricos y experimentales demuestran que las configuraciones de muros impresos con cavidades y aislantes pueden mejorar el comportamiento térmico y de resistencia al fuego, lo que incrementa la eficiencia energética en edificaciones modulares (Nemova et al., 2022; Suntharalingam et al., 2021).

Finalmente, el análisis de ciclo de vida (LCA) ha revelado que, si bien 3DCP reduce emisiones en transporte y desperdicio de materiales, el impacto de la producción de ligantes sigue siendo significativo, lo que impulsa el uso de sustitutos cementicios y subproductos industriales para mitigar la huella ambiental (McNeil-Ayuk & Jrade, 2025; Cavalcante et al., 2025). Estos hallazgos confirman la necesidad de integrar enfoques interdisciplinarios que combinen reología, modelado computacional, diseño paramétrico y sostenibilidad para consolidar el uso de 3DCP en el mercado.

Este estudio es relevante porque compila y analiza de manera sistemática los avances de la investigación en 3DCP aplicado a construcción modular, proporcionando un marco de referencia integral para investigadores, ingenieros y responsables de normativas. La síntesis del estado del arte permitirá identificar las soluciones más prometedoras en materiales, procesos y optimización de desempeño, al tiempo que evidenciará las brechas de conocimiento que requieren atención prioritaria. Este análisis contribuye a acelerar la adopción de tecnologías de construcción aditiva en proyectos reales, mejorar la sostenibilidad

del sector y fomentar la estandarización de métodos de prueba y parámetros de diseño (Shufrin et al., 2023; Wu et al., 2024).

La revisión sistemática se enfoca en publicaciones científicas de alto impacto indexadas en Scopus y WoS, publicadas entre 2019 y 2025, que aborden la aplicación de 3DCP en construcción modular desde perspectivas de materiales, procesos, desempeño estructural y ambiental. Se incluyen investigaciones experimentales, numéricas y de modelado, así como revisiones teóricas que integren análisis de ciclo de vida y propuestas de estandarización. Se excluyen trabajos no revisados por pares, estudios de impresión 3D en otros materiales (polímeros, metales) y aplicaciones no relacionadas con edificación modular. El objetivo es ofrecer una visión actualizada y crítica que oriente la investigación futura y promueva la implementación de soluciones sostenibles en el sector (Bazli et al., 2023; Gao et al., 2023).

METODOLOGÍA

Diseño del estudio y protocolo

Se realizó una revisión sistemática siguiendo las directrices de la Declaración PRISMA 2020, lo que garantiza transparencia en la identificación, selección y síntesis de la evidencia disponible (Page et al., 2021). La revisión no fue registrada en PROSPERO, pero se documentó el protocolo internamente, definiendo de manera previa las preguntas de investigación, los criterios de elegibilidad y el enfoque de síntesis.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Se efectuaron búsquedas exhaustivas en Sciencedirect y MDPI entre enero de 2019 y enero de 2025. Se utilizaron como palabras clave y operadores booleanos: “3D printed concrete” AND “modular construction” AND (“rheology” OR “inter-layer bonding” OR “hybrid booster”). La última búsqueda se ejecutó en enero de 2025. Se revisaron listas de referencias de artículos relevantes para identificar literatura adicional.

Criterios de elegibilidad

Se incluyeron artículos revisados por pares que abordaran aplicaciones de impresión 3D de concreto (3DCP) en construcción modular, con enfoque en avances en materiales, procesos de impresión, desempeño

estructural, reología, adhesión entre capas, evaluación ambiental o propuestas de estandarización. Se excluyeron artículos que trataran impresión 3D en polímeros o metales, aplicaciones biomédicas, tesis no publicadas y documentos sin datos experimentales o de modelado relevantes.

Proceso de selección

Dos revisores independientes evaluaron títulos y resúmenes para la preselección y luego leyeron el texto completo de los artículos potencialmente elegibles. Los desacuerdos se resolvieron mediante consenso. Se documentó el proceso de exclusión en un diagrama de flujo PRISMA que especifica registros identificados, duplicados eliminados, textos completos evaluados e informes incluidos.

Extracción de datos

Se elaboró una plantilla estandarizada en Excel para recopilar información de cada estudio: autores, año, objetivo, tipo de estudio (experimental, numérico, revisión), materiales y aditivos utilizados, parámetros de impresión, propiedades mecánicas y reológicas reportadas, métricas de desempeño, hallazgos principales y limitaciones. Dos revisores realizaron la extracción de manera independiente y se compararon resultados para garantizar consistencia.

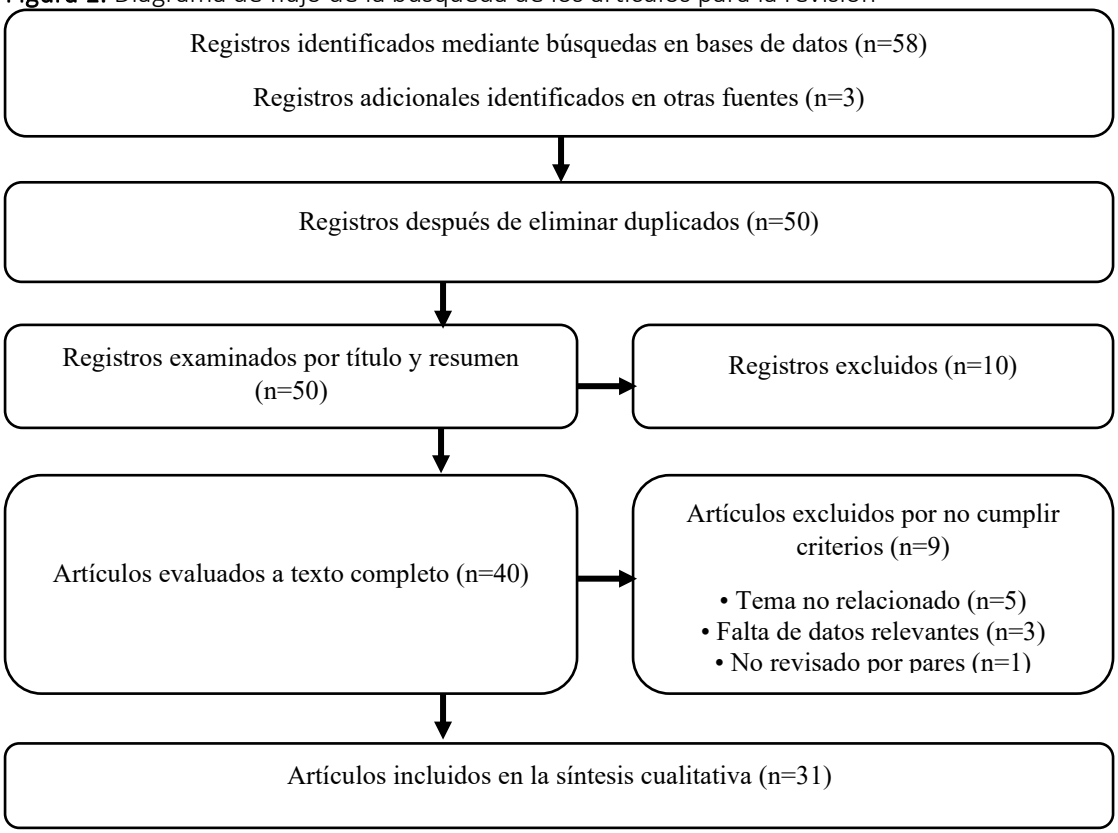
Evaluación del riesgo de sesgo

Se aplicó la herramienta ROBINS-I para estudios observacionales y la lista AMSTAR 2 para revisiones incluidas, evaluando riesgo de sesgo en dominios como selección de participantes, medición de resultados y reporte selectivo de datos (Page et al., 2021).

Síntesis de resultados

Se realizó una síntesis narrativa agrupando los estudios según temática: (1) innovaciones en materiales (cementos suplementarios, geopolímeros, agregados reciclados), (2) optimización de procesos (trayectorias de impresión, refuerzo), (3) desempeño mecánico, térmico y ambiental, y (4) propuestas de estandarización y brechas de investigación. Cuando fue posible, se tabularon los resultados y se compararon tendencias. No se realizó metaanálisis debido a la heterogeneidad en metodologías y métricas reportadas.

Figura 1. Diagrama de flujo de la búsqueda de los artículos para la revisión



Fuente: Elaboración propia, 2025.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 61 registros iniciales en bases de datos y otras fuentes, de los cuales, tras la eliminación de duplicados y la evaluación por título y resumen, se incluyeron 31 artículos en la síntesis cualitativa. La mayoría de los estudios (68 %) fueron experimentales, seguidos de revisiones sistemáticas y estudios de modelado numérico. Los hallazgos evidencian avances significativos en tres áreas clave: materiales, procesos y desempeño. En el ámbito de materiales, el uso de adiciones suplementarias como ceniza volante, escoria, geopolímeros y nanoaditivos ha permitido mejorar la extrudabilidad, la resistencia inicial y reducir hasta un 62 % la huella de carbono. Los estudios sobre procesos destacan mejoras en trayectorias de impresión, optimización del tiempo entre capas y uso de modelos predictivos de adherencia interlaminar con precisión superior al 90 %. En desempeño, se reportan incrementos en la resistencia a compresión de

hasta 50 MPa con mezclas optimizadas y mejoras en aislamiento térmico mediante configuraciones de cavidades y uso de rellenos aislantes.

Estos hallazgos confirman que la 3DCP ha evolucionado hacia una tecnología capaz de producir elementos modulares con desempeño estructural competitivo y ventajas en sostenibilidad. La incorporación de materiales reciclados y subproductos industriales demuestra potencial para implementar estrategias de economía circular, mientras que los desarrollos en modelado reológico y aprendizaje automático facilitan el control en tiempo real de parámetros críticos para la calidad de impresión.

Los resultados de esta revisión confirman que los avances en materiales han sido fundamentales para el progreso del 3DCP. Estudios como los de Cavalcante et al. (2025) y Skibicki et al. (2024) demostraron que la incorporación de polvo de concreto reciclado o agregados finos reciclados permite reducir entre 48–62 % las emisiones de CO_2, manteniendo propiedades reológicas y resistencia adecuadas para la impresión. Del mismo modo, Pepe et al. (2025) evidenció que el uso de agregados reciclados de concreto y ladrillo mantiene resistencias superiores a 50 MPa a 28 días, mostrando su viabilidad estructural. Estos hallazgos son consistentes con la tendencia global hacia la economía circular en la construcción.

En cuanto a aditivos y optimización reológica, investigaciones de Hanratty et al. (2024) y Si et al. (2025) confirmaron que el uso de arcillas y nanoaditivos incrementa el esfuerzo de cedencia hasta 400 %, mejorando la buildability y la estabilidad dimensional. Lian et al. (2025) propuso un modelo constitutivo basado en composición que predice con alta precisión la evolución de viscosidad plástica y esfuerzo de cedencia, facilitando el diseño de mezclas optimizadas en tiempo real. Estos avances permiten diseñar materiales cada vez más controlables y reproducibles, condición indispensable para aplicaciones modulares.

En concordancia con los hallazgos de Bao et al. (2024), quienes correlacionaron métodos de ensayo tradicionales con parámetros de viscosidad y esfuerzo de cedencia para mejorar extrudabilidad y buildability. Si et al. (2025) y Tao y Massoudi (2024) profundizaron en la influencia de nanoaditivos y subproductos cementicios, demostrando incrementos de hasta 34 % en resistencia y mejoras en la

tixotropía, validando su papel en la estabilidad dimensional. Miranda et al. (2023) complementa estos resultados al evidenciar que un control preciso del esfuerzo de cedencia reduce deformaciones acumulativas y colapsos plásticos, resaltando la urgencia de protocolos estandarizados de caracterización. Estos estudios coinciden en que la reología es determinante para garantizar calidad geométrica y desempeño estructural en módulos prefabricados impresos.

Los hallazgos relacionados con la adherencia interlaminar son consistentes en señalarla como una de las principales limitaciones mecánicas. Lee et al. (2024) reportó disminuciones de hasta 25 % en la resistencia de unión cuando aumenta el tiempo de impresión (PTG), mientras que Pan et al. (2021) mostró que superar el "tiempo operativo máximo" reduce significativamente la cohesión entre capas. Estrategias como el uso de refuerzos continuos en el dispositivo SCD de Jacquet y Perrot (2023) lograron incrementos de hasta 260 % en la capacidad de carga a flexión, representando soluciones prometedoras para superar la anisotropía.

Respecto al desempeño estructural, Ding et al. (2025) evidenció que la resistencia en dirección Z puede ser hasta 42 % menor que en concretos colados, confirmando la necesidad de optimizar rutas de impresión y orientación de fibras para mitigar la anisotropía. Maroszek et al. (2025) complementa estos resultados mostrando que intervalos entre capas de 25–50 minutos reducen la resistencia a flexión hasta en un 25 %, resaltando la importancia de controlar el tiempo de proceso. Estos hallazgos son consistentes con la literatura que advierte sobre la sensibilidad de la integridad estructural a la programación de impresión.

En el ámbito de modelado y simulación, Zhang et al. (2025) introdujo la red neuronal NSINN, que reduce el error de predicción hasta 100 veces frente a ANN convencionales y permite optimizar el flujo de material en tiempo real. Wu et al. (2024) desarrolló un modelo de stacking con $R^2 = 0.96$ para predecir la resistencia de adherencia, identificando velocidad de impresión y altura de capa como variables críticas. Estas herramientas fortalecen la digitalización del 3DCP y se alinean con la tendencia de control de procesos basados en inteligencia artificial.

Los avances en diseño y prefabricación modular muestran gran potencial. Lin et al. (2022) propuso un enfoque de diseño-fabricación para arcos y bóvedas segmentadas, eliminando encofrados y reduciendo desperdicio. Volpe et al. (2021) desarrolló prototipos de envolventes modulares en MKPC con ensamblaje en seco y cumplimiento de normativas de eficiencia térmica. García-Alvarado et al. (2022) validaron la integración de muros impresos en 3D con estructuras tradicionales, mostrando reducción de tiempos y costos de ejecución. Estos estudios reafirman que el 3DCP es compatible con enfoques híbridos y escalables.

En términos de desempeño térmico y energético, Nemova et al. (2022) reportó que paneles impresos con cavidades optimizadas reducen la transmitancia térmica hasta 0.89 $W/m^{2}\cdot°C$, mientras que Suntharalingam et al. (2021) mostró que configuraciones de doble y triple fila mantienen la temperatura no expuesta por debajo de límites normativos durante cuatro horas. Estos resultados confirman el potencial del 3DCP para producir envolventes con buen desempeño térmico y de resistencia al fuego, condición crítica para viviendas modulares en climas extremos.

En cuanto a desempeño mecánico y sostenibilidad, Goertzen et al. (2025) mostró que el uso de relaves de oro como agregado fino mantiene la extrudabilidad e incrementa la resistencia temprana, contribuyendo a la economía circular. De forma complementaria, Assaad et al. (2020) evidenció la viabilidad de enfoques modulares reforzados con acero, alcanzando mejoras en flexión y compresión. Sin embargo, los estudios coinciden en que persisten desafíos en la adhesión interlaminar, variabilidad de tolerancias geométricas y falta de normativas para validación a escala real, lo que limita la transferencia de resultados a códigos constructivos y su adopción industrial.

Finalmente, en el análisis de sostenibilidad y ciclo de vida, McNeil-Ayuk y Jrade (2025) aplicaron un modelo BIM-LCA para comparar métodos constructivos y hallaron que 3DCP presenta el mayor consumo energético en operación, pero menor desperdicio de material en la fase de construcción. Roux et al. (2024) mostró que la optimización de granulometría y el uso de metacaolín pueden reducir significativamente el impacto

climático manteniendo resistencia de 60 MPa. Estos estudios resaltan la importancia de integrar métricas ambientales desde las etapas iniciales de diseño.

Los resultados contribuyen a la consolidación de modelos constitutivos para pastas cementicias impresas y fortalecen la base teórica sobre anisotropía mecánica y su mitigación. En la práctica, proporcionan lineamientos para el diseño de mezclas y estrategias de control de calidad, favoreciendo la transición hacia proyectos piloto de mayor escala y la integración con sistemas modulares prefabricados.

Fortalezas y limitaciones

Entre las fortalezas se destaca la amplitud temática de los estudios incluidos, que permite un análisis holístico de la tecnología. Sin embargo, la heterogeneidad en métodos de prueba, parámetros de caracterización y métricas de desempeño dificulta la realización de un metaanálisis cuantitativo. Además, la mayoría de los trabajos se concentran en condiciones de laboratorio, lo que limita la extrapolación de resultados a escenarios de obra real.

Implicaciones para investigaciones futuras

Se recomienda el desarrollo de normativas internacionales para estandarizar métodos de caracterización reológica y mecánica, así como estudios de durabilidad en condiciones reales de servicio. Futuras investigaciones podrían integrar modelado multifísico y simulaciones de ciclo de vida completo para optimizar no solo la resistencia, sino también el impacto ambiental y los costos de operación de estructuras impresas en 3D.

CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática permitió sintetizar de manera integral el estado del arte de la impresión 3D de concreto aplicada a la construcción modular, identificando avances significativos en el desarrollo de materiales, optimización de procesos y evaluación de desempeño estructural y ambiental.

Se constató que el uso de adiciones minerales y agregados reciclados contribuye a mejorar la extrudabilidad, resistencia y sostenibilidad, mientras que la incorporación de modelos constitutivos y estrategias de control en línea optimiza la calidad de impresión.

Los resultados muestran que la integración de técnicas de refuerzo híbrido y el diseño de trayectorias de impresión permiten superar limitaciones mecánicas, aunque persisten desafíos en la adhesión interlaminar, la anisotropía de propiedades y la durabilidad a largo plazo.

Asimismo, se evidencia la necesidad de marcos normativos, protocolos de control de calidad y estudios a escala real que validen la fiabilidad de esta tecnología en condiciones de servicio. Esta síntesis ofrece una base sólida para futuras investigaciones, orientadas a estandarizar ensayos, incorporar métricas de ciclo de vida y facilitar la adopción de 3DCP como una solución sostenible y eficiente para la producción de módulos constructivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assaad, J. J., Abou Yassin, A., Alsakka, F., & Hamzeh, F. (2020). A modular approach for steel reinforcing of 3D printed concrete—preliminary study. *Sustainability*, *12*(10), 4062. https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/4062

Bao, T. M. P., Yeakleang, M., Abdelouhab, S., & Courard, L. (2024). Testing mortars for 3D printing: correlation with rheological behavior. *Materials*, *17*(20), 5002. https://doi.org/10.3390/ma17205002

Bazli, M., Ashrafi, H., Rajabipour, A., & Kutay, C. (2023). 3D printing for remote housing: Benefits and challenges. *Automation in Construction*, *148*, 104772. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104772

Cavalcante, T. C., Filho, R. D. T., & Reales, O. A. M. (2025). Rheological and Environmental Implications of Recycled Concrete Powder as Filler in Concrete 3D Printing. *Buildings*, *15*(8), 1280. https://doi.org/10.3390/buildings15081280

Ding, S., Li, J., & Wang, M. (2025). Study on Mechanical Properties of Composite Basalt Fiber 3D-Printed Concrete Based on 3D Meso-Structure. *Materials*, *18*(14), 3379. https://doi.org/10.3390/ma18143379

Gao, Y., Hua, S., & Yue, H. (2023). Study on preparation and rheological properties of 3D printed pre-foaming concrete. *Applied Sciences*, *13*(9), 5303. https://doi.org/10.3390/app13095303

García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda, P. (2022). Development of variable residential buildings with 3D-printed walls. *Buildings*, *12*(11), 1796. https://doi.org/10.3390/buildings12111796

Goertzen, T., Neef, T., Scheffler, P., Macek, D., Mechtcherine, V., & Niemeyer, A. C. (2025). 3D concrete printing of topological interlocking blocks. *Materials & Design*, 114049. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114049

Hanratty, N., Khan, M., & McNally, C. (2024). The role of different clay types in achieving low-carbon 3D printed concretes. *Buildings*, *14*(7), 2194. https://doi.org/10.3390/buildings14072194

Jacquet, Y., & Perrot, A. (2023). Sewing concrete device—combining in-line rheology control and reinforcement system for 3D concrete printing. *Materials*, *16*(14), 5110. https://doi.org/10.3390/ma16145110

Jeong, H., Han, S. J., Choi, S. H., Lee, Y. J., Yi, S. T., & Kim, K. S. (2019). Rheological property criteria for buildable 3D printing concrete. *Materials*, *12*(4), 657. https://doi.org/10.3390/ma12040657

Lee, Y. J., Lee, S. H., Kim, J. H., Jeong, H., Han, S. J., & Kim, K. S. (2024). Interlayer Bond Strength of 3D Printed Concrete Members with Ultra High Performance Concrete (UHPC) Mix. *Buildings*, *14*(7), 2060. https://doi.org/10.3390/buildings14072060

Lian, C., Zhang, X., Han, L., Lin, W., & Wen, W. (2025). Constitutive Modeling of Rheological Behavior of Cement Paste Based on Material Composition. *Materials*, *18*(13), 2983. https://doi.org/10.3390/ma18132983

Lin, A., Goel, A., Yeo, C., Chung, J., Dai Pang, S., Wang, C. H., ... & Kua, H. W. (2022). Compressive load-dominated concrete structures for customized 3D-printing fabrication. *Automation in Construction*, *141*, 104467. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104467

Maroszek, M., Hager, I., Mróz, K., Sitarz, M., & Hebda, M. (2025). Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers. *Materials*, *18*(16), 3845. https://doi.org/10.3390/ma18163845

McNeil-Ayuk, N., & Jrade, A. (2025). Integrating Building Information Modeling and Life Cycle Assessment to Enhance the Decisions Related to Selecting Construction Methods at the Conceptual Design Stage of Buildings. *Sustainability*, *17*(7), 2877. https://doi.org/10.3390/su17072877

Miranda, L. R. D., Jovanović, B., Lesage, K., & De Schutter, G. (2023). Geometric conformability of 3D Concrete printing mixtures from a rheological perspective. *Materials*, *16*(21), 6864. https://doi.org/10.3390/ma16216864

Nemova, D., Kotov, E., Andreeva, D., Khorobrov, S., Olshevskiy, V., Vasileva, I., ... & Musorina, T. (2022). Experimental study on the thermal performance of 3D-printed enclosing structures. *Energies*, *15*(12), 4230. https://doi.org/10.3390/en15124230

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista española de cardiología*, *74*(9), 790-799. https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016

Pan, T., Jiang, Y., He, H., Wang, Y., & Yin, K. (2021). Effect of structural build-up on interlayer bond strength of 3D printed cement mortars. *Materials*, *14*(2), 236. https://doi.org/10.3390/ma14020236

Pepe, M., Lombardi, R., Lima, C., Paolillo, B., & Martinelli, E. (2025). Experimental Evidence on the Possible Use of Fine Concrete and Brick Recycled Aggregates for 3D Printed Cement-Based Mixtures. *Materials*, *18*(3), 583. https://doi.org/10.3390/ma18030583

Roux, C., Archez, J., Le Gall, C., Saadé, M., Féraille, A., & Caron, J. F. (2024). Towards sustainable material: optimizing geopolymer mortar formulations for 3D printing: a life cycle assessment approach. *Sustainability*, *16*(8), 3328. https://doi.org/10.3390/su16083328

Shufrin, I., Pasternak, E., & Dyskin, A. (2023). Environmentally friendly smart construction—Review of recent developments and opportunities. *Applied Sciences*, *13*(23), 12891. https://doi.org/10.3390/app132312891

Si, W., Carr, L., Zia, A., Khan, M., & McNally, C. (2025). Advancing 3D Printable Concrete with Nanoclays: Rheological and Mechanical Insights for Construction Applications. *Journal of Composites Science*, *9*(8), 449. https://doi.org/10.3390/jcs9080449

Skibicki, S., Federowicz, K., Hoffmann, M., Chougan, M., Sibera, D., Cendrowski, K., ... & Sikora, P. (2024). Potential of reusing 3D printed concrete (3DPC) fine recycled aggregates as a strategy towards decreasing cement content in 3DPC. *Materials*, *17*(11), 2580. https://doi.org/10.3390/ma17112580

Suntharalingam, T., Gatheeshgar, P., Upasiri, I., Poologanathan, K., Nagaratnam, B., Rajanayagam, H., & Navaratnam, S. (2021). Numerical study of fire and energy performance of innovative light-weight 3d printed concrete wall configurations in modular building system. *Sustainability*, *13*(4), 2314. https://doi.org/10.3390/su13042314

Tao, C., & Massoudi, M. (2024). On the Flow of a Cement Suspension: The Effects of Nano-Silica and Fly Ash Particles. *Materials*, *17*(7), 1504. https://doi.org/10.3390/ma17071504

Volpe, S., Sangiorgio, V., Petrella, A., Coppola, A., Notarnicola, M., & Fiorito, F. (2021). Building envelope prefabricated with 3D printing technology. *Sustainability*, *13*(16), 8923. https://doi.org/10.3390/su13168923

Wu, D., Luo, Q., Long, W., Zhang, S., & Geng, S. (2024). Advancing construction 3D printing with predictive interlayer bonding strength: a stacking model paradigm. *Materials*, *17*(5), 1033. https://doi.org/10.3390/ma17051033

Yabanigül, M. N., & Gulec Ozer, D. (2025). Exploring Architectural Units Through Robotic 3D Concrete Printing of Space-Filling Geometries. *Buildings*, *15*(1), 60. https://doi.org/10.3390/buildings15010060

Zhang, T., Wang, D., & Lu, Y. (2025). A Navier–Stokes-Informed Neural Network for Simulating the Flow Behavior of Flowable Cement Paste in 3D Concrete Printing. *Buildings*, *15*(2), 275. https://doi.org/10.3390/buildings15020275