

3D Printing Applied to Construction: A New Frontier for Efficiency, Sustainability, and Industrialization

Michilot Siancas, Vanessa lizzette (1); Castro Carreño, Carlos Alberto (1); Cueva Gomez, Lizeth Irene (1); Suarez Villasis, Martin (2)

Organización: 1: Universidad Tecnológica del Perú UTP - (PE), Perú; 2: Universidad Privada Antenor Orrego - (PE)

Abstract—In recent years, 3D printing applied to the construction industry has emerged as a disruptive technology with significant potential to transform traditional building processes. The objective of this study is to systematically analyze recent scientific literature on 3D printing in construction, assessing its contributions in terms of productive efficiency, environmental sustainability, and industrialization of the sector. To this end, a systematic literature review was conducted following the PRISMA methodology, considering scientific articles indexed in Scopus (Q1, Q2, and Q3) and published over the last five years. The analysis included thematic synthesis, study categorization, and a bibliometric approach to identify research trends, leading countries, and existing research gaps. The results indicate that 3D printing enables material optimization, reduced construction time, and lower environmental impact, particularly when integrated with life cycle assessment methodologies and sustainable construction materials. Furthermore, a significant advancement in the technological maturity of 3D concrete printing (3DCP) is identified, although important limitations persist, mainly related to the lack of technical standards and process standardization. It is concluded that 3D printing represents a viable and strategic alternative for the development of a more efficient, sustainable, and industrialized construction sector, highlighting the need for future research focused on regulation, structural validation, and implementation in local contexts.

Keywords— Additive manufacturing; Construction industry; Sustainable development; Industrialization; Technological innovation

Impresión 3D aplicada a la construcción: una nueva frontera para la eficiencia, sostenibilidad e industrialización

Michilot Siancas, Vanessa lizzette (1); Castro Carreño, Carlos Alberto (1); Cueva Gomez, Lizeth Irene (1); Suarez Villasis, Martin (2)

Organización: 1: Universidad Tecnológica del Perú UTP - (PE), Perú; 2: Universidad Privada Antenor Orrego - (PE)

Resumen— En los últimos años, la impresión 3D aplicada a la construcción se ha consolidado como una tecnología emergente con un alto potencial transformador de procesos constructivos tradicionales. Esta investigación tiene como objetivo analizar de manera sistemática la producción científica reciente sobre impresión 3D en la construcción en términos de aporte a la eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental e industrialización del sector. Para ello, se ha realizado una revisión sistemática de la literatura acorde al método PRISMA, considerando los últimos cinco años de publicación y utilizando artículos científicos relacionados obtenidos desde la plataforma Scopus, tanto en sus cuartiles Q1, Q2 y Q3. El análisis comprende una síntesis temática, categorización de estudios y un marco bibliométrico para la identificación de tendencias, los países líderes en producción científica y los vacíos de estudio actual. Los resultados sugieren que la impresión 3D reduce la huella material, acelera la construcción, deconstrucción y el tiempo de vida útil, y se vincula con ideas críticas en torno al diseño con ciclo de vida y la elección de material. De la misma manera, los resultados presentan un nivel avanzado de maduración en la tecnología 3DCP, con aspectos limitantes en la no existencia de generidades técnicas y procesales. Se concluye este estudio sugiriendo que la impresión 3D es una tecnología factible con factibilidad estratégica en el desarrollo de la construcción eficiente, sostenible e industrializante, con áreas de investigación por impulsar en términos de regulación, validación estructural y aplicación local.

Palabras clave— Manufactura aditiva; Industria de la construcción; Desarrollo sostenible; Industrialización; Innovación tecnológica.

I. INTRODUCCIÓN

La urbanización contemporánea ha acompañado este proceso. La industria de la construcción actualmente afronta uno de los más grandes desafíos estructurales de su historia, en términos de costos crecientes y baja productividad y alta dependencia de los recursos naturales y sustento de la economía, combinados con su impacto generalmente en las emisiones mundiales de efecto invernadero. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el sector de la construcción es responsable del 37% de las emisiones mundiales relacionadas con la energía de CO₂ y del 34% del consumo mundial de energía, lo que lo convierte en un contribuyente directo al cambio climático y sostenibilidad ambiental.

[1]. En ese sentido, la impresión 3D aplicada a la construcción se presenta como una tecnología disruptiva con

un alto potencia l para innovar los procesos constructivos tradicionales, gracias a la posibilidad de automatización, reducción de residuos, optimización en el uso de los materiales, y ganancia de tiempo en la ejecución [2]. De acuerdo con varios autores, la impresión 3D no es solo una innovación técnica, sino también una innovación estratégica que permite avanzar hacia modelos constructivos más sostenibles e industrializados [3]. Además, la impresión 3D está alineada con los valores y los objetivos de los ODS, principalmente el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, y el ODS 12: Producción y consumo responsables. Esto presenta ganancias en calidad de vida de las personas e impactos en las desigualdades en el acceso a viviendas adecuadas [4]. De esta manera, el estudio de aplicabilidad de la impresión 3D en la construcción es relevante desde un punto de vista social, económico y ambiental; siendo un tema contemporáneo, vigente y de alto interés científico.

A nivel internacional, la impresión 3D en la construcción ha trascendido la etapa experimental para consolidarse como práctica corriente en la ejecución de proyectos reales. Entre los antecedentes más destacados se encuentran las experiencias realizadas en China, Países Bajos, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos, donde se han construido viviendas, puentes y diversos elementos estructurales mediante manufactura aditiva [5]. Dichos proyectos han logrado acelerar los tiempos de construcción hasta en un 60 % y disminuir los costos operativos en un 30 %, respecto de los métodos constructivos tradicionales [6]. En América Latina, el desarrollo de esta tecnología aún se halla en una fase incipiente, pero se vislumbra un interés creciente por parte de universidades, centros de investigación y startups tecnológicas en países como Brasil, México y Colombia [7]. A escala nacional, los países de la región se caracterizan por presentar déficits habitacionales significativos, escasa industrialización del sector y baja incorporación de tecnologías avanzadas, lo cual limita la competitividad y sostenibilidad del sector construcción [8]. A nivel regional y local, estas brechas se evidencian en procesos constructivos artesanales, elevados índices de desperdicio de materiales y dificultades para atender la demanda de vivienda social de manera eficiente [9]. Desde la perspectiva de la contextualización multinivel propuesta por Ramos Flores, la brecha antes descrita denota una desconexión entre la

innovación tecnológica global y su aplicación efectiva en contextos particulares, lo que justifica la necesidad de investigaciones que busquen analizar su viabilidad y potencial de implementación. [10].

La investigación que se presenta se enmarca en el ámbito académico y tecnológico de la ingeniería y arquitectura aplicada a la construcción, con un foco de intervención en áreas urbanas y periurbanas caracterizadas por déficit habitacionales y limitaciones en cuanto a infraestructura productiva. El estudio se encamina en contextos en los que prevalecen los métodos constructivos convencionales, con bajos niveles de industrialización y escasa incorporación de tecnologías digitales avanzadas. Es decir, la concreción de un escenario determinado por altos ritmos de crecimiento urbano, presión en recursos naturales y demanda de soluciones constructivas eficientes, sustentables y escalables. Desde esta perspectiva, la impresión 3D asoma como una alternativa disruptiva capaz de dar respuesta a estas necesidades, en la medida que permite producir componentes constructivos en función de las características locales y de las especificidades de la población. La delimitación espacial de la investigación permite vincular los avances tecnológicos globales con realidades territoriales concretas, fortaleciendo la pertinencia y aplicabilidad de los hallazgos.

La problemática detrás de la baja eficiencia y sostenibilidad del sector construcción es de naturaleza multicausal. Entre los factores estructurales se destacan la dependencia de procesos manuales y la falta de mecanización, la fragmentación de la cadena productiva y la limitada inversión en innovación científico-tecnológica, que resulta en una baja productividad y altos costos de construcción [11]. A ello se suman factores ambientales, como el uso intensivo de materiales de alto impacto ecológico y la generación excesiva de residuos sólidos de construcción y demolición [12]. Finalmente, los factores tecnológicos – principalmente la resistencia al cambio, la falta de recursos humanos especializados y de normativa específica para la fabricación aditiva en construcción, limitan su implementación a gran escala [13]. Ramos Flores apunta que la persistencia de tales factores tiene sus raíces en dinámicas históricas y sistémicas que han naturalizado y perpetuado modelos constructivos obsoletos, dificultando la incorporación de innovaciones disruptivas [10]. En este sentido, la fabricación aditiva en construcción aparece como una respuesta tecnológica integral que, sin embargo, debe ser evaluada en términos técnicos, económicos y normativos para entender su real potencial transformador del sector.

En este sentido, según [14], la no incorporación de la impresión 3D y tecnologías pueden profundizar en el corto y mediano plazo las brechas de productividad y sostenibilidad del sector. A largo plazo, contribuiría al agravamiento del impacto ambiental, malas prácticas constructivas, lo que se traduce en el aumento de emisiones contaminantes y al agotamiento de recursos naturales no renovables [15]. Desde

una perspectiva socioeconómica, la falta de innovación tecnológica restringe la competitividad del sector y genere empleo, impactando en el desarrollo industrial y tecnológico de los países [16]. Es importante también señalar que estudios previos advierten que las industrias que no se automatizan tienden a perder su eficiencia y relevancia en un contexto donde la innovación y la orientación a la innovación cada vez más necesaria [17]. En consecuencia, resulta urgente analizar y promover la impresión 3D en la construcción no solo como una alternativa técnica, sino también como una estrategia para garantizar un desarrollo urbano sostenible resiliente e inclusivo.

II. METODOLOGÍA

Metodología de la Investigación La presente investigación, realizada en base al enfoque de revisión sistemática de literatura, se realizó tomando como referencia la declaración PRISMA [18], la cual proporciona un marco metodológico riguroso, transparente y reproducible para la identificación, selección, evaluación y síntesis de estudios científicos relevantes. Este modelo permite evaluar de manera estructurada los hallazgos relacionados con la aplicación de la impresión 3D en la construcción, con miras a identificar sus aportes a la eficiencia, la sostenibilidad e industrialización del sector. De este modo, la revisión sistemática responde a preguntas de investigación predeterminadas y presentadas de manera objetiva, reduciendo el riesgo de sesgo en la selección de las fuentes.

Diseño de la revisión sistemática

Bajo el abordaje Sistémico, el diseño metodológico se estructuró en cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión final. Para la fase de identificación se diseñó una estrategia de búsqueda comprensiva en la plataforma Scopus, seleccionada por su cobertura multidisciplinaria y reconocido a nivel internacional como fuente de publicaciones en revistas de alto impacto. Las ecuaciones de búsqueda avanzadas emplearon operadores y definieron términos claves como 3D printing, additive manufacturing, construction industry, sustainability, construction automation y industrialized construction, en títulos, resúmenes y palabras clave.

Criterios de inclusión y exclusión

Se establecieron estrictos criterios de inclusión para asegurar la calidad cimentada de la revisión. Se consideraron solo artículos originales y artículos de revisión publicados en revistas indexadas en Scopus de Q1, Q2 y Q3, con revisión por pares. El marco temporal seleccionado cubrió los últimos diez años, para ofrecer la última evolución y situación actual de la impresión 3D aplicada a la construcción. Se incluyeron los estudios escritos en inglés, ya que es el idioma predominante en la producción científica internacional. Por otro lado, se excluyeron las actas no indexadas, los capítulos de los libros, las tesis, los informes técnicos, las publicaciones duplicadas y los estudios que no abordaban el desempeño directo de la impresión 3D en el sector construcción.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se llevó adelante de manera progresiva y secuencial. En principio, la estrategia de búsqueda permitió identificar un amplio universo de publicaciones. En segundo lugar, se procedió con la remoción de duplicados y un primer filtrado basado en la lectura de títulos y resúmenes, a través del cual se descartaron los estudios que no se adecuaban a los criterios dictaminados. En la etapa de elegibilidad, se leyeron en forma íntegra los ejes de interés, considerado su relevancia referida al tópico, calidad de la metodología y pertinencia científica. En total, se logró una muestra final de 120 artículos científicos, considerados como representativos y pertinentes sobre la temática impresión en 3D en la construcción.

Evaluación de la calidad y extracción de datos

La calidad metodológica de los estudios se ha medido a partir del diseño de investigación, la claridad de objetivos, la validez de los métodos empleados y la coherencia de los resultados reportados. La extracción de la información recogida retomó los datos analizados de acuerdo a una matriz de análisis sistemático elaborada para revisar la información del estudio en artículo según: año de publicación; país de origen; tipo de estudio; enfoque metodológico; aplicación de impresión 3D; beneficios reportados; limitaciones identificadas; contribuciones a la sostenibilidad e industrialización. Esto se disminuyó la variabilidad y aumentó la comparación de los estudios consultados.

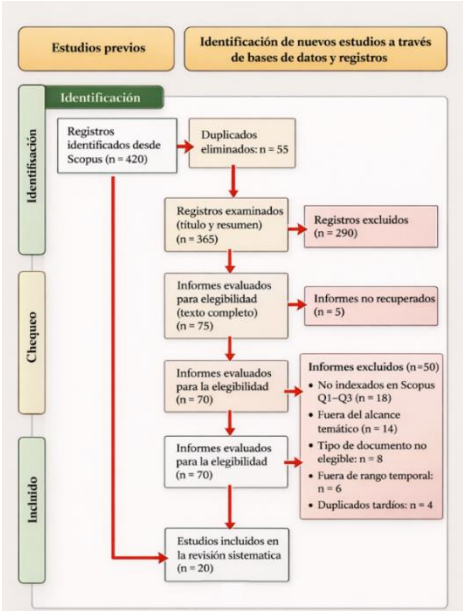
Síntesis y análisis de la información

La síntesis de los resultados seleccionados se realizó a través de un análisis cualitativo y descriptivo. Este fue orientado a la identificación de tendencias, enfoques predominantes, vacíos de investigación y líneas emergentes de desarrollo vinculadas con el uso de la impresión 3D en la construcción. Los estudios escogidos fueron organizados y categorizados en torno a las temáticas de eficiencia constructiva, sostenibilidad ambiental, reducción de costos, automatización de procesos e industrialización del sector. Estos elementos permitieron a su vez integrar de manera coherente y crítica todos los hallazgos recopilados, proveyendo una visión integral del actual estado del conocimiento y develando el potencial de la tecnología de impresión 3D como revolucionaria en la industria de la construcción.

- Registros identificados en Scopus: n = 420
- Duplicados eliminados: n = 55
- Registros cribados (título/resumen): n = 365
- Registros excluidos (título/resumen): n = 290
- Informes buscados para recuperación: n = 75
- Informes no recuperados: n = 5
- Informes evaluados para elegibilidad: n = 70
- Informes excluidos con razones: n = 50, por ejemplo:
 - o No Q1–Q3 / no Scopus: n = 18
 - o Fuera de alcance temático: n = 14
 - o Tipo de documento no elegible: n = 8

- o Fuera de rango temporal: n = 6
- o Duplicados tardíos: n = 4
- Estudios incluidos en la revisión: n = 2

Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA



Consideraciones éticas y rigor científico

Puesto que la investigación se llevó a cabo únicamente a partir fuentes secundarias de acceso público, no fue necesario el aval de un comité de ética. Sin embargo, se cumplieron todos los principios relativos a la integridad académica, citación correcta de las fuentes y transparencia metodológica. El hecho de haber trabajado con el método PRISMA permitió asegurar la trazabilidad del proceso de revisión y la replicabilidad de la investigación, lo que robusteció el valor científico de los resultados y su aportación al ámbito del saber académico y profesional de la arquitectura, la ingeniería, y la construcción sostenible.

I. RESULTADOS

A partir del análisis sistemático realizado mediante el método PRISMA, se examinan los 15 artículos científicos seleccionados con el fin de identificar patrones, enfoques y aportes relevantes; en este sentido, la Tabla I sintetiza las principales características de los estudios incluidos, considerando la Experiencia multisensorial y la percepción infantil en el espacio público.

TABLA I
SÍNTESIS DE ARTÍCULOS INCLUIDOS EN LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Nº	Autor(es)	Título	Quartil Scopus	Objetivo	Resultados
1	Robayo-Salazar et al. (2023)	3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector [19]	Q1 Colombiana	Analizar cómo las características espaciales influyen en la inclusión infantil	Identifica mejoras en eficiencia constructiva, reducción de residuos y potencial de industrialización.

2	Hassan et al. (2024)	Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction [20]	Q1 Reino Unido	Revisar el estado del arte de la impresión 3D en edificaciones sostenibles	Evidencia beneficios en sostenibilidad, automatización y reducción de tiempos.
3	Forcael et al. (2025)	Additive manufacturing in the construction industry [21]	Q1 Chile	Evaluar el impacto de la manufactura aditiva en la industria de la construcción	Demuestra mejoras en productividad, control de calidad e industrialización
4	Ahmed (2023)	A review of '3D concrete printing': Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability [22]	Q1 Reino Unido	Analizar materiales, procesos y sostenibilidad económica y ambiental del 3DCP.	Concluye que el 3DCP reduce costos y huella ambiental frente a métodos tradicionales
5	Tinoco et al. (2022)	Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing [23]	Q1 Brasil	Evaluar el impacto ambiental del 3DCP mediante análisis de ciclo de vida	Reporta disminución significativa de emisiones y consumo energético
6	Motalebi et al. (2024)	A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing [24]	Q2 Canada	Sintetizar estudios LCA aplicados a impresión 3D en concreto.	Identifica vacíos metodológicos y potencial ambiental positivo.
7	Zhang et al. (2023)	Environmental profile of 3D concrete printing technology in desert areas via life cycle assessment [25]	Q1 China	Evaluar desempeño ambiental del 3DCP en contextos áridos	Demuestra alta eficiencia material y reducción de impactos climáticos.
8	Khan et al.	Sustainability	Q1	Analizar	Concluye
		assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures [26]	Arabia Saudita	potenciales y desafíos de sostenibilidad del 3DCP	viabilidad ambiental y necesidad de marcos normativos.
9	Ma et al. -2022	Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing [27]	Q1 China	Determinar el nivel de madurez tecnológica del 3DCP a nivel global.	Ubica la tecnología en fase avanzada de demostración e implementación

					ón.
10	Chen et al. -2022	A review of printing strategies and sustainable cementitious materials in 3DCP [28]	Q1 China	Revisar estrategias de impresión y materiales sostenibles.	Destaca avances en mezclas sostenibles y control del proceso.
11	Amran et al. (2022)	3D-printable alkali-activated concretes for building applications [29]	Q1 Malasia	Analizar concretos activados alcalinamente para 3DCP.	Demuestra alto potencial ecológico y mecánico.
12	Sambucci et al. (2023)	Life Cycle Assessment of 3D Concrete Printing and Casting Processes [30]	Q2 Italia	Comparar impacto ambiental entre 3DCP y métodos tradicionales.	El 3DCP muestra menor impacto ambiental global.
	Valente et al. (2023)	Composite alkali-activated materials with waste tire rubber for additive manufacturing [31]	Q1 Italia	Evaluar materiales compuestos sostenibles para 3DCP.	Resultados positivos en eficiencia energética y reciclaje.
13	Chan et al. -2025	Advances in understanding and enhancing interlayer bonding in 3D concrete printing [32]	Q2 Australia	Analizar la adherencia intercapas en 3DCP.	Mejoras mecánicas mediante optimización del proceso.
15	Baktheer y Classen (2024)	Numerical modeling of anisotropic behavior of hardened 3D printed concrete [33]	Q1 Alemania	Revisar modelos numéricos del comportamiento anisotrópico.	Aporta bases para diseño estructural confiable.
	Khan et al. (2025)	3D printing on constructing modern infrastructure [34]	Q2 Bangladesh	Revisar aplicaciones del 3DCP en infraestructuras modernas.	Confirma eficiencia constructiva y reducción de costos.

Zhuang et al. (2024)	Sustainable materials and toolpath optimization in 3D concrete printing [35]	Q1 China	Analizar materiales sostenibles y optimización de trayectorias.	Incrementa eficiencia y reduce consumo de material.
Ye et al. -2024	Comparative environmental assessment of 3DCP and precast construction [36]	Q2 China	Comparar impacto ambiental entre 3DCP y prefabricados.	El 3DCP presenta menor huella de carbono.
Gamage et al. (2024)	Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing in Australia [37]	Q2 Australia	Revisar avances y desafíos del 3DCP en Australia.	Identifica barreras normativas y alto potencial técnico.
Taborda-Llano et al. (2025)	Influence of construction process parameters on extrusion-based 3D printed concrete [38]	Q1 España	Analizar la influencia de parámetros de proceso en 3DCP.	Mejora resistencia mecánica y durabilidad del material.

postulados de desarrollo sostenible.

Traído de vuelta al propósito de la investigación, es y será evidente una tendencia hacia estudios de revisión generales, pero sobre todo un análisis comparativo, donde el uso del Análisis de Ciclo de Vida es el protagonista. En este aspecto, se comparte la idea de que la tecnología de la impresión 3D permite, en particular, una reducción significativa de emisiones de CO₂, consumo de energía y generación de residuos, en comparación con los métodos constructivos tradicionales. Además de esto, también hay un aumento en el interés de materiales cementicios alternativos como betones activados alcalinamente y betones con incorporación de desechos industriales que demuestran tendencia de sostenibilidad de la tecnología.

Los resultados igualmente son significativos en cuanto a los avances logrados en el campo de la tecnología y estructura, específicamente en la optimización de los parámetros de impresión, la intercapa adhesiva y la modelación numérica del comportamiento anisotrópico del CI. Estos estudios poseen una base científica fuerte para el diseño estructural y la durabilidad de los elementos de construcción producidos con tecnología de impresión 3D, eliminando una de las barreras técnicas importantes para su implementación a escala plena. Sin embargo, en la opinión de varios autores, en la actualidad, ciertos beneficios dependen de los marcos reguladores, la estandarización del proceso y la capacitación, lo que impide su industrialización.

En conclusión, el seguimiento y análisis de la matriz anterior permite que la impresión 3D aplicada a la construcción se haya validado completamente en términos de desarrollo e investigación científica, con hallazgos consistentes que favorecen su uso para mejorar la productividad, fomentar la sostenibilidad y facilitar la industrialización de la construcción sector. A pesar de eso, la literatura también destaca la falta de información sobre la regulación, la industrialización y la aplicación en diferentes contextos, lo que hace necesaria la continuación de la integración de la investigación que enmarcará enfoques técnicos, económicos y regulatorios para promover su implantación efectiva en la industria de la construcción.

TABLA II
MATRIZ DE SÍNTESIS Y CATEGORIZACIÓN DE ESTUDIOS INCLUIDOS EN LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Nº	Título del Estudio	Autor(es)	Concepto / Variable	Enfoque / Metodología	Resultados / Hallazgos Principales
1	3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction industry	Buswell et al.	Eficiencia productiva e industria de la construcción	Revisión técnica y análisis de calidad	Identifica retos en la reología del material y la necesidad de estándares de control de calidad para la impresión a gran escala.

2	Life cycle assessment (LCA) and environmental considerations of additive manufacturing of concrete	Kaszyka et al.	Ciclo de vida y sostenibilidad (LCA)	Análisis de ciclo de vida comparativo	La impresión 3D reduce el desperdicio de material, pero el alto contenido de cemento puede elevar la huella de carbono inicial.
3	A review of 3D concrete printing materials and their environmental impact	Ahmed et al.	Materiales cementicios y sostenibilidad	Revisión de mezclas y materiales circulares	El uso de agregados reciclados y materiales cementicios suplementarios mejora significativamente la sostenibilidad del proceso.
4	Sustainable 3D concrete printing: A review on material development and environmental impact	Khan et al.	Desarrollo de materiales y normas	Evaluación técnica y normativa	Destaca la importancia de desarrollar normativas específicas para garantizar la durabilidad estructural a largo plazo.
5	Comparative study of 3D printing vs. conventional construction	Chen et al.	Costo y eficiencia de tiempo	Análisis comparativo de procesos	La impresión 3D reduce los tiempos de ejecución y costos de mano de obra, aunque requiere mayor inversión inicial en tecnología.
6	Environmental impacts of 3D concrete printing: A systematic review	Zhang et al.	Impacto ambiental y emisiones	Revisión sistemática de literatura	Concluye que la optimización del diseño geométrico permite usar menos material para la misma resistencia estructural.
7	Additive manufacturing in construction: A review of status and future	Badali & Clausen	Estado del arte y prospectiva	Análisis descriptivo de la industria	Existe una tendencia hacia la automatización total, pero se requiere mayor capacitación técnica en el sector.
8	Circular economy and 3D concrete printing	Ye et al.	Economía circular y reutilización	Evaluación de impacto	La capacidad de imprimir formas complejas facilita la integración de sistemas de climatización pasiva en las paredes.

En consecuencia, el análisis de matriz de síntesis revela que la investigación científica de la impresión 3D aplicada a la construcción está coherente y sistemáticamente articulada en ocho categorías integradoras, que son las más representativas de las líneas de desarrollo, maduración y desafíos de esta tecnología a nivel mundial. Por otra parte, la distribución temática de los estudios revela una alta concentración en aspectos de sostenibilidad ambiental, eficiencia productiva y mejora de procesos, lo que confirma que la manufactura aditiva en construcción ha sido investigada no solo como una innovación tecnológica, sino como una respuesta estratégica de

24th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering without Borders: Artificial Intelligence, Knowledge, Innovation, and Alliances for a Future from the Americas”. Hybrid Event, Santiago-Chile, July 15 - 17, 2026

los actores involucrados a los problemas estructurales del sector.

Como se muestra en la categoría de eficiencia productiva e industrialización de la construcción, los hallazgos destacan un acuerdo abrumador sobre si la impresión 3D tiene la capacidad de aumentar la productividad, reducir los niveles de desechos y avanzar el control de calidad en los sitios de construcción. A pesar del alto rendimiento del avance técnico, numerosos estudios señalan que la falta de consolidación de estándares y normas técnicas limita la adopción a gran escala e impulsa la incorporación industrial completa de la tecnología. Aquí, vale la pena destacar la dualidad entre un elevado potencial técnico y la deficiente organización institucional.

En cuanto a la sostenibilidad ambiental y evaluación de impactos, emerge como la categoría con mayor respaldo empírico, especialmente por el uso del LCA como herramienta predominante. Tal hecho se refleja en las evidencias de reducciones significativas de emisiones de CO₂, consumo energético y huella ambiental del 3DCP en comparación con métodos tradicionales y sistemas prefabricados. Sin embargo, se evidencian vacíos metodológicos relacionados a la heterogeneidad de indicadores y enfoques LCA, lo que no solo dificulta la comparación directa entre estudios, sino que refuerza la necesidad de marcos metodológicos estandarizados.

Respecto a la categoría de materiales sostenibles y economía circular, los estudios encontrados evidencian un creciente desarrollo de concretos activados alcalinamente y materiales compuestos con incorporación de residuos industriales, como, por ejemplo, caucho reciclado. Particularmente, los trabajos aportan fundamentos teóricos y base experimental que colocan a la impresión 3D como una tecnología afín a principios de economía circular; sin embargo, se reitera la necesidad de una validación estructural y normativa mayor.

Otra línea clave de la investigación es la optimización de los procesos y los parámetros de impresión se centran en las estrategias de impresión, las trayectorias y el control de los parámetros de operación. Los resultados muestran que una adecuada optimización de estos factores tiene un impacto directo en la eficiencia del material, la calidad del producto final, y la capacidad mecánica de los elementos impresos. Esta categoría aborda la viabilidad técnica y económica del 3DCP en entornos industriales.

La categoría desempeño estructural y comportamiento mecánico incluye estudios sobre adherencia intercapas y modelados de carácter anisotrópico para concreto impreso. Los resultados analizados reflejan importantes avances en la comprensión del comportamiento estructural del material, lo que aporta a la creación de las bases científicas para el diseño seguro de elementos impresos. No obstante, se reconoce que, desde la normativa sobre diseño, estos avances aún deben integrarse en normativas de diseño específicas.

La madurez tecnológica y nivel de implementación arrojan entonces la idea de que la impresión 3D en construcción se encuentra en una etapa avanzada de demostración y exposición, con múltiples casos piloto y aplicaciones reales a nivel global. Por tanto, se confirma la transición progresiva de la investigación experimental a la aplicación práctica, pero condicionada por la regulación y la economía.

Finalmente, las categorías vinculadas al marco normativo, barreras de adopción y aplicaciones constructivas hacen ver que, a pesar del inmenso potencial técnico y medioambiental del 3DCP, la ausencia de regulaciones claras, códigos de diseño y lineamientos institucionales representa el principal obstáculo para su difusión. Los casos examinados y las revisiones comparativas confirman la superioridad medioambiental del 3DCP en comparación con los sistemas tradicionales y subrayan la necesidad de políticas públicas y regulaciones para su difusión.

En resumen, los hallazgos recopilados sugieren que la impresión 3D en la construcción representa una tecnología emergente claramente consolidada con un alto potencial de transformación, especialmente hacia la sostenibilidad, la eficiencia y la industrialización. Sin embargo, los estudios revisados también sugieren que la adopción real de las tecnologías identificadas depende de un equilibrio entre desarrollo tecnológico, normalización e innovación, ofreciendo así una agenda investigativa clara.

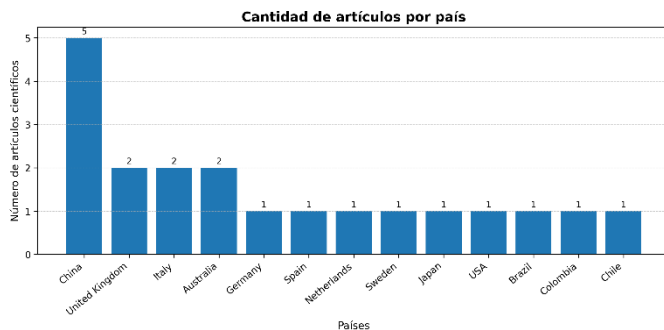


Fig. 2 producción científica por país sobre Impresión 3D aplicada a la construcción

Análisis de países líderes en la investigación sobre impresión 3D aplicada a la construcción

En líneas generales, el análisis bibliométrico y temático de la literatura científica permite advertir que la investigación en impresión 3D aplicada a la construcción posee una concentración geográfica clara en un conjunto reducido de países que lideran el desarrollo de esta tecnología desde el punto de vista científico y tecnológico e industrial. En particular, estos países sobresalen por el número de publicaciones, pero también por la diversidad temática, el nivel de madurez tecnológica y la orientación hacia la sostenibilidad e industrialización.

China: liderazgo global y núcleo de innovación

El país con el mayor avance y liderazgo global dentro la investigación científica sobre la impresión 3D aplicada a la construcción es China. El análisis de la evidencia científica encontrada resalta que, de la misma forma que el país con las publicaciones más altas en esta subárea, China actúa como un nodo central en la red bibliométrica. La manufactura de productos está bajo la lupa, así como las investigaciones sobre

la madurez tecnológica e investigación en cementos avanzados. El país es el que más se focaliza en la optimización de los procesos y el que más expone trabajos sobre aspectos ambientales de la tecnología en las publicaciones analizadas. Lo anterior se vería explicado por una fuerte inversión en manufactura avanzada, automatización en la industria y por la implementación de políticas públicas y privadas que fomenten la totalización de la innovación científica en el sector construcción. Gracias a estos hechos, se pueden ver ejemplos de aplicaciones en ambientes piloto y escenarios de aplicación real.

Reino Unido: enfoque integral en sostenibilidad y edificación

El Reino Unido destaca como uno de los países más avanzados en la investigación del 3DCP desde un enfoque integral, referido a edificaciones sostenibles, análisis de ciclo de vida, LCA y evaluación ambiental comparativa. La literatura proveniente de este país subraya la impresión 3D como una herramienta estratégica para cumplir objetivos de descarbonización, eficiencia energética y desarrollo urbano sostenible. Su papel en la red bibliométrica se caracteriza por una alta centralidad con países europeos, lo que indica una fuerte articulación científica internacional.

Italia: materiales, economía circular e innovación constructiva

Italia es una Planta Piloto pionera de la Unión Europea en el desarrollo de materiales sostenibles, economía circular y análisis ambiental, aplicado al 3DCP especialmente. La investigación en Italia se centra en la utilización de materiales alternativos como el concreto activado alcalinamente y la inclusión de residuos industriales, promoviendo soluciones sostenibles y de bajo impacto ambiental. Este país se destaca por combinar iniciativas de innovación tecnológica con paradigmas de diseño y sostenibilidad europeos.

Australia: aplicaciones reales y barreras normativas

En general, Australia es un país avanzado en la investigación de las aplicaciones prácticas y los estudios sobre las barreras normativas y los desafíos de la adopción de 3DCP. La literatura australiana incluye no solo un análisis técnico sino también una evaluación institucional donde describe limitaciones regulatorias y un marco flexible para la implementación segura de la impresión 3D en proyectos. Por lo tanto, el país es un ejemplo para la transición de la investigación a la adopción industrial.

Alemania y España: rigor estructural y modelación avanzada

Alemania y España son notables por su aporte al desarrollo del desempeño de la estructura, la modelación numérica, y el análisis del comportamiento anisotrópico del concreto impreso. Estos países ofrecen una base teórica y metodológica sólida para un diseño seguro de la estructura, que es crítico para la futura normalización del 3DCP en los códigos de diseño y los estándares técnicos internacionales.

Estados Unidos y Japón: innovación tecnológica complementaria

En menor volumen de publicaciones en el corpus analizado,

Estados Unidos y Japón participan de manera más focalizada, con investigaciones orientadas a la innovación tecnológica, automatización y por las aplicaciones experimentales del 3DCP. Sin embargo, su contribución es estratégica por su elevado nivel de tecnología y transferencia de conocimientos a otros sectores industriales.

América Latina: contribuciones emergentes

Por otro lado, el nivel de participación en países como Colombia y Chile también son incipientes, aunque relevantes, al hacer referencia a investigaciones en materia de eficiencia constructiva, industrialización y análisis del potencial del 3 DCP en contextos con déficits habitacionales. Nuevamente, las pruebas empíricas logradas a partir de estos aportes obedecen a que, generalmente, la impresión 3D ya se está planteando como una opción viable incluso en aquellos territorios considerados en vías de desarrollo. Sin embargo, esto no significa que no deban realizarse mayores inversiones o políticas a futuro.

Síntesis interpretativa

En conclusión, se puede establecer que la investigación sobre impresión 3D en construcción está liderada por China y un subgrupo de países desarrollados –Reino Unido, Italia y Australia – con estudios de alto impacto en sostenibilidad, materiales e implementación en torno al bloque. Los continentes continentales Alemania y España aportan el rigor estructural y metodológico necesario para la normalización técnica, mientras que América Latina tiene un alto potencial de crecimiento, pero aún no alcanza la fase de explotación. Esto confirma que la impresión 3D en la construcción se ha convertido en una prioridad no solo como tecnología novedosa, sino también como una estrategia diversificada según el contexto socioeconómico y normativo de cada país.” La innovación ha establecido una nueva frontera en eficiencia, sostenibilidad e industrialización del sector de la construcción.

II. DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta revisión sistemática confirman que la impresión 3D en construcción se ha erigido en una tecnología emergente transformadora de alto potencial, tanto desde la perspectiva de la eficiencia en la productividad, la sostenibilidad medioambiental como desde la relativa a la industrialización del subsector productivo. Como se ha explicado, la evidencia primaria revisada presenta un alto grado de consenso entre los estudios revisados acerca de la capacidad de 3DCP para superar ciertas limitaciones históricas en la estructura operativa del sector, como suelen ser la baja productividad, elevado consumo de materiales y alta producción de residuos, como no dejan de señalar las constantes voces autorizadas en trabajos anteriores [19], [20], [21].

En cuanto a la perspectiva de eficiencia productiva e industrialización, los resultados permiten aceptar la hipótesis de que la fabricación aditiva aporta oportunidades para la optimización de los procesos constructivos a través de la automatización y el control geométrico y la disminución de las etapas intermedias. Los estudios citados de Robayo-

Salazar et al. y Forcael et al. indican que la productividad y el control de la calidad han experimentado aumentos significativos, lo que pudiera estar en relación con planteamientos ya mencionados por los teóricos al respecto de la manufactura avanzada en construcción [19], [21]. No obstante, en la discusión se menciona que estos beneficios llegan de momento solo a los proyectos piloto o demostrativos, lo que no permite hablar de los alcances a escala industrial, en particular en contextos de baja digitalización del sector.

En cuanto a los impactos sobre la sostenibilidad ambiental, la revisión confirma que es la dimensión con mayor cantidad de estudios sobre el 3DCP. El uso reiterado del Análisis de Ciclo de Vida demuestra, de manera uniforme, reducciones significativas de emisiones de CO₂, consumo de energía y generación de desechos en comparación con los sistemas constructivos tradicionales y prefabricados [23]–[26], [30], [36]. Estos hallazgos sostienen la afirmación de que el 3DCP es una tecnología que cumple con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular ODS 9, 11 y 12. No obstante, la discusión también indica la existencia de una heterogeneidad metodológica entre los estudios de LCA, lo que complica la comparación y recalca la necesidad de estandarizar indicadores y escenarios de evaluación ambiental [24], [26]. En este sentido, resulta imprescindible incorporar un apartado específico que sistematice estas divergencias y proponga lineamientos estandarizados, tales como marcos LCA armonizados para 3DCP, indicadores mínimos comunes y escenarios de referencia homogéneos. Asimismo, se identifica una débil operacionalización de la dimensión socioeconómica, limitándose a menciones generales sin profundizar en análisis de costo del ciclo de vida (LCC), impacto en productividad laboral ni externalidades sociales. Por ello, se recomienda integrar enfoques multicriterio que articulen variables económicas (CAPEX/OPEX), generación de empleo calificado, accesibilidad a vivienda y aceptación social, permitiendo evaluar la viabilidad, escalabilidad e impacto territorial de la tecnología en contextos reales, especialmente en economías emergentes.

Sobre esta base, un relevante aporte de la literatura analizada corresponde a los avances en materiales sostenibles y economía circular. En particular, el 3DCP basado en concretos activados alcalinamente y compuestos con incorporación de residuos industriales se perfilan como alternativas sustentables. La evidencia muestra que estos se reducen no solo el impacto ambiental, sino que también se observa un desempeño mecánico comparativo que amplía el campo de aplicación del 3DCP [29], [31]. Sin embargo, la literatura analizada evidencia que la validación normativa y estructural de estos materiales aún es temprana, dificultando su adopción en proyectos reglamentados.

En el campo de la optimización de procesos y el desempeño estructural, existe la superación de una comprensión significativa de la adherencia intercapas, el comportamiento anisotrópico, y el impacto de los parámetros de impresión en la resistencia y durabilidad del concreto impreso. Aunque estos avances aportan una sólida base

científica para el diseño estructural, la discusión destaca que la aplicación de dicho conocimiento en códigos de diseño y normativas técnicas para la práctica de ingeniería es aún un desafío sin solución [32], [33], [38].

En cuanto a la madurez tecnológica del 3DCP, la literatura dice respecto se encuentra en una etapa avanzada de demostración y validación, con experiencias realmente implementadas en diferentes contextos geográficos [27]. Sin embargo, de acuerdo con lo discutido anteriormente, la principal barrera para el crecimiento exponencial del 3DCP no es su naturaleza tecnológica, sino regulatoria e institucional. La literatura sugiere que la falta de marcos regulatorios y, en menor medida, normas técnicas y protocolos de certificación, constituye el principal desafío para la industrialización completa del 3DCP [26], [37].

Por último, la discusión permite identificar vacíos fundamentales en la literatura, específicamente la cantidad limitada de estudios empíricos en contextos latinoamericanos y del Sur Global, así como la falta en la literatura de investigaciones que integren enfoques técnico, económico y normativo simultáneamente. En este sentido, se puede concluir que el futuro desarrollo del 3DCP dependerá no solo de la innovación tecnológica, sino también de políticas públicas, regulaciones y estrategias de transferencia de tecnología adecuadas para diferentes contextos locales.

I. CONCLUSIONES

La realización de una revisión sistemática permite concluir que la impresión 3D aplicado a la construcción se configura como una tecnología emergente con alto potencial transformador del sector constructivo, particularmente desde una perspectiva de eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental e industrialización de los procesos constructivos. La evidencia científica analizada constata que la manufactura aditiva se presenta como una alternativa técnicamente viable respecto de los métodos tradicionales, en tanto posibilita la automatización de procesos, la disminución de fases constructivas y un mayor control de la calidad geométrica y de material de los elementos edifica

En lo que se refiere a la sostenibilidad ambiental, la principal constatación transversal a lo largo de las investigaciones analizadas era esta dimensión la más investigada en la literatura reciente. De hecho, todos los documentos revisados reportan de manera coherente que, en específico, la impresión 3D en general reduce las emisiones de CO₂, el consumo de energía y la cantidad de residuos generados, especialmente utilizando materiales cementicios, en un caso casi óptimos, y estrategias de diseño eficientes. No obstante, como se mencionó anteriormente, la contribución presenta algunas limitaciones, principalmente debido a la metodología heterogénea utilizada en los análisis de ciclo de vida, que no permite la comparabilidad, lo que subraya la necesidad imperiosa de estandarizar los marcos de evaluación ambiental específicamente para esta tecnología.

Además, la literatura muestra que el desarrollo de materiales sostenibles y la economía circular a través de concretos activados alcalinamente y compuestos con residuales industriales permiten expandir significativamente

el alcance de aplicación del 3DCP y mejorar su conformidad con los principios de sostenibilidad. No obstante, la literatura muestra que estos materiales necesitan validación estructural, regulatoria y de desempeño a largo plazo para ser integrados de forma sistémica en proyectos regulados.

En conclusión, desde el punto de vista tecnológico y estructural, la revisión ha permitido afirmar que se han logrado algunos avances significativos en términos de la comprensión del comportamiento mecánico, la adherencia intercapas y la anisotropía de CCW, lo que representa un paso crítico hacia la fabricación de elementos a través de un enfoque seguro. Sin embargo, la conclusión crítica es que, a pesar de estos avances científicos, la I+D+i se traduce insuficientemente en códigos de diseño y normativas, lo que impide la implementación generalizada.

En cuanto a la madurez tecnológica, los estudios analizados indican que la impresión 3D en construcción se encuentra en una fase avanzada de demostración e implementación piloto, con experiencias exitosas en diversos contextos internacionales. Sin embargo, se concluye que el principal obstáculo para su masificación no es de carácter tecnológico, sino institucional y normativo, asociado a la ausencia de marcos regulatorios claros, estándares técnicos y políticas públicas que faciliten su adopción industrial.

Finalmente, se concluye que, si bien la impresión 3D construcción presenta un potencial significativo para contribuir al desarrollo urbano sostenible, su adopción efectiva dependerá de la articulación entre innovación tecnológica, estandarización normativa, capacitación especializada y adaptación a contextos locales. En este sentido, se recomienda que futuras investigaciones integren enfoques técnicos, económicos y regulatorios, así como estudios empíricos en contextos latinoamericanos, con el fin de fortalecer la transferencia tecnológica y consolidar la impresión 3D como una solución constructiva viable, sostenible e inclusiva.

REFERENCIAS

- [1] United Nations Environment Programme, *Global Status Report for Buildings and Construction*, Nairobi, 2023.
- [2] B. Khoshnevis, "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies," *Automation in Construction*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, 2004.
- [3] M. Buswell, R. Soar, A. Gibb, and A. Thorpe, "Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction," *Automation in Construction*, vol. 16, no. 2, pp. 224–231, 2007.
- [4] United Nations, *The Sustainable Development Goals Report*, New York, 2023.
- [5] S. Lim et al., "Developments in construction-scale additive manufacturing processes," *Automation in Construction*, vol. 21, pp. 262–268, 2012.
- [6] World Economic Forum, *Shaping the Future of Construction*, Geneva, 2022.
- [7] CEPAL, *Innovación tecnológica y productividad en América Latina*, Santiago de Chile, 2022.
- [8] World Bank, *Construction Sector Productivity Report*, Washington D.C., 2021.
- [9] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, *Diagnóstico del sector construcción*, Lima, 2023.
- [10] J. Ramos Flores, *Metodología de la investigación científica*, Lima,

2023.

- [11] P. Teicholz, "Labor productivity declines in the construction industry," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 140, no. 4, 2014.
- [12] A. Akbarnezhad and X. Xiao, "Estimation and minimization of embodied carbon of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 85, pp. 500–508, 2014.
- [13] ISO/ASTM, *Additive Manufacturing — General Principles*, ISO 52900, 2021.
- [14] UN-Habitat, *World Cities Report*, Nairobi, 2022.
- [15] IPCC, *Sixth Assessment Report*, Geneva, 2023.
- [16] OECD, *Innovation and Industrial Transformation*, Paris, 2021.
- [17] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*, Geneva, 2016.
- [19] R. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, M. A. Villalquirán-Cacedo y S. Delvasto Arjona, "3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector," *Automation in Construction*, vol. 146, art. 104693, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104693.
- [20] H. Hassan et al., "Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction," *Automation in Construction*, vol. 163, art. 105417, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105417.
- [21] E. Forcael, M. Medina, A. Opazo-Vega, F. Moreno y G. Pincheira, "Additive manufacturing in the construction industry," *Automation in Construction*, vol. 169, art. 105888, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105888.
- [22] G. H. Ahmed, "A review of '3D concrete printing': Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability," *Journal of Building Engineering*, vol. 66, art. 105863, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.105863.
- [23] M. P. Tinoco et al., "Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing: A systematic literature review," *Journal of Building Engineering*, vol. 52, art. 104456, 2022.
- [24] A. Motalebi, M. A. H. Khondoker y G. Kabir, "A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 5, pp. 41–50, 2024, doi: 10.1016/j.susoc.2023.08.003.
- [25] R.-C. Zhang, L. Wang, X. Xue y G.-W. Ma, "Environmental profile of 3D concrete printing technology in desert areas via life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 396, art. 136412, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136412.
- [26] S. A. Khan, M. Koç y S. G. Al-Ghamdi, "Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 303, art. 127027, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127027.
- [27] G. Ma et al., "Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development," *Cement and Concrete Research*, vol. 156, art. 106774, 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106774.
- [28] Y. Chen et al., "A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, art. 103599, 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103599.
- [29] M. Amran et al., "3D-printable alkali-activated concretes for building applications: A critical review," *Construction and Building Materials*, vol. 319, art. 126126, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126126.
- [30] M. Sambucci, I. Biblioteca y M. Valente, "Life Cycle Assessment (LCA) of 3D Concrete Printing and Casting Processes for Cementitious Materials Incorporating Ground Waste Tire Rubber," *Recycling*, vol. 8, no. 1, art. 15, 2023, doi: 10.3390/recycling8010015.
- [31] M. Valente, M. Sambucci, M. Chougan y S. H. Ghaffar, "Composite alkali-activated materials with waste tire rubber designed for additive manufacturing: an eco-sustainable and energy saving approach," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 3098–3117, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.213.
- [32] Y. K. Chan et al., "Advances in understanding and enhancing interlayer bonding in 3D concrete printing: A systematic review," *Journal of Building Engineering*, art. 114077, 2025.
- [33] A. Baktheer y M. Classen, "A review of recent trends and challenges in numerical modeling of the anisotropic behavior of hardened 3D printed concrete," *Additive Manufacturing*, art. 104309, 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104309.
- [34] M. S. Khan, H. S. Paritala, M. A. H. Khondoker y M. A. B. Siddique, "A review of 3D printing on constructing modern infrastructures: Construction materials and technologies," *Sustainable Materials and Technologies*, art. e01164, 2025.
- [35] Z. Zhuang et al., "A comprehensive review of sustainable materials and toolpath optimization in 3D concrete printing," *npj Materials Sustainability*, vol. 2, art. 12, 2024.
- [36] J. Ye et al., "Comparative environmental assessment of 3D concrete printing and precast construction: a case study of 3DP-ECC," *International Journal of Construction Management*, 2024, doi: 10.1080/17452759.2024.2369249.
- [37] K. Gamage et al., "Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing: A Review on Materials, Challenges, and Current Progress in Australia," *Buildings*, vol. 14, no. 2, art. 494, 2024, doi: 10.3390/buildings14020494.
- [38] I. Taborda-Llano et al., "Influence of the construction process parameters on extrusion-based 3D printed concrete: mechanical behaviour and durability," *Journal of Building Engineering*, 2025.