

EL FUTURO DE LAS ESTRUCTURAS ADAPTATIVAS: IMPRESIÓN 4D COMO REVOLUCIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

THE FUTURE OF ADAPTIVE STRUCTURES: 4D PRINTING AS A REVOLUTION IN CONSTRUCTION

Gabriel Montúfar

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería. Panamá.
gabriel.montufar@up.ac.pa, <https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

Artículo recibido: 30 de marzo de 2024

Artículo aceptado: 25 de septiembre de 2024

DOI <https://doi.org/10.48204/j.colegiada.v6n1.a5872>

RESUMEN

La impresión 4D ha surgido como una evolución significativa de la impresión 3D, integrando materiales inteligentes capaces de cambiar sus propiedades en respuesta a estímulos ambientales. Esta tecnología tiene el potencial de revolucionar la construcción al permitir la creación de estructuras adaptativas que pueden responder dinámicamente a condiciones como la temperatura, la humedad y la presión. El objetivo de este estudio es proporcionar una visión prospectiva sobre el futuro de las estructuras adaptativas en la construcción, explorando cómo la impresión 4D puede transformar este campo. Se analizan las tendencias emergentes, los desafíos actuales y las oportunidades futuras, con el fin de contribuir al conocimiento existente y orientar investigaciones futuras. Se realizó una revisión exhaustiva del estado del arte, utilizando bases de datos científicas relevantes para identificar artículos clave sobre la impresión 4D en construcción. Los estudios seleccionados fueron evaluados en función de su relevancia temática, contribución al conocimiento y calidad metodológica, centrándose en materiales inteligentes, tecnologías de fabricación, aplicaciones prácticas, y barreras para la implementación. Los resultados indican que, aunque la impresión 4D ofrece ventajas significativas en términos de adaptabilidad y sostenibilidad, su adopción a gran escala enfrenta desafíos considerables. Estos incluyen la durabilidad de los materiales, los altos costos de producción y la falta de normativas claras. Sin embargo, las proyecciones futuras señalan que el desarrollo de nuevos materiales y la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el IoT podrían superar estas barreras. Este estudio subraya la importancia de la impresión 4D en el futuro de la construcción, destacando tanto sus ventajas como sus limitaciones. Se recomienda continuar la investigación en esta área, con un enfoque en la creación de normativas y el desarrollo de materiales más asequibles y duraderos. El impacto de estas innovaciones podría ser significativo, transformando la forma en que concebimos y construimos.

PALABRAS CLAVE: Tecnología avanzada, materiales inteligentes, fabricación aditiva, industria de la construcción.

ABSTRACT

4D printing has emerged as a significant evolution of 3D printing, integrating smart materials capable of changing their properties in response to environmental stimuli. This technology has the potential to revolutionize construction by enabling the creation of adaptive structures that can respond dynamically to conditions such as temperature, humidity, and pressure. The objective of this study is to provide a prospective view on the future of adaptive structures in construction, exploring how 4D printing can transform this field. Emerging trends, current challenges, and future opportunities are analyzed to contribute to existing knowledge and guide future research. A comprehensive review of the state of the art was conducted, utilizing relevant scientific databases to identify key articles on 4D printing in construction. The selected studies were evaluated based on their thematic relevance, contribution to knowledge, and



methodological quality, focusing on smart materials, manufacturing technologies, practical applications, and barriers to implementation. The results indicate that, although 4D printing offers significant advantages in terms of adaptability and sustainability, its large-scale adoption faces considerable challenges. These include the durability of materials, high production costs, and the lack of clear regulations. However, future projections suggest that the development of new materials and the integration of emerging technologies such as artificial intelligence and IoT could overcome these barriers. This study underscores the importance of 4D printing in the future of construction, highlighting both its advantages and limitations. It is recommended to continue research in this area, with a focus on creating regulations and developing more affordable and durable materials. The impact of these innovations could be significant, transforming the way we conceive and build.

KEYWORDS: advanced technology, intelligent materials, additive manufacturing, construction industry.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la industria de la construcción ha sido testigo de una rápida evolución tecnológica, impulsada por la necesidad de desarrollar soluciones más sostenibles, eficientes y adaptativas para enfrentar desafíos globales como el cambio climático, la urbanización acelerada y la escasez de recursos. Dentro de este contexto, la tecnología de impresión 4D ha emergido como una innovación disruptiva que promete transformar la manera en que se diseñan y construyen estructuras (Spiegel et al., 2019; de Kergariou et al., 2022). A diferencia de la impresión 3D tradicional, que crea objetos estáticos a partir de capas de material, la impresión 4D incorpora materiales inteligentes que permiten a las estructuras cambiar su forma y funcionalidad en respuesta a estímulos ambientales específicos, como la temperatura, la humedad o la luz (Lui et al., 2019).

El problema fundamental que este trabajo aborda es la creciente necesidad de estructuras que no solo sean funcionales y estéticamente agradables, sino que también puedan adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno, aumentando su longevidad y reduciendo la necesidad de mantenimiento constante. Las estructuras adaptativas impresas en 4D ofrecen una solución potencial a este desafío, pero su implementación a gran escala aún enfrenta obstáculos significativos, tanto técnicos como económicos (Bodaghi et al., 2019; Agarwal et al., 2021).

El objetivo de este trabajo es proporcionar una visión prospectiva del futuro de las estructuras adaptativas en la construcción, explorando cómo la impresión 4D puede revolucionar este campo. A través de un análisis exhaustivo de las tendencias emergentes y una discusión de los desafíos y oportunidades, este artículo busca contribuir al cuerpo de conocimiento existente, proponiendo un marco para la investigación futura y posibles aplicaciones prácticas en la industria (Wang et al., 2021). Este enfoque es particularmente relevante en un momento en que la sostenibilidad y la adaptabilidad son prioridades críticas en el diseño y la construcción de infraestructuras.

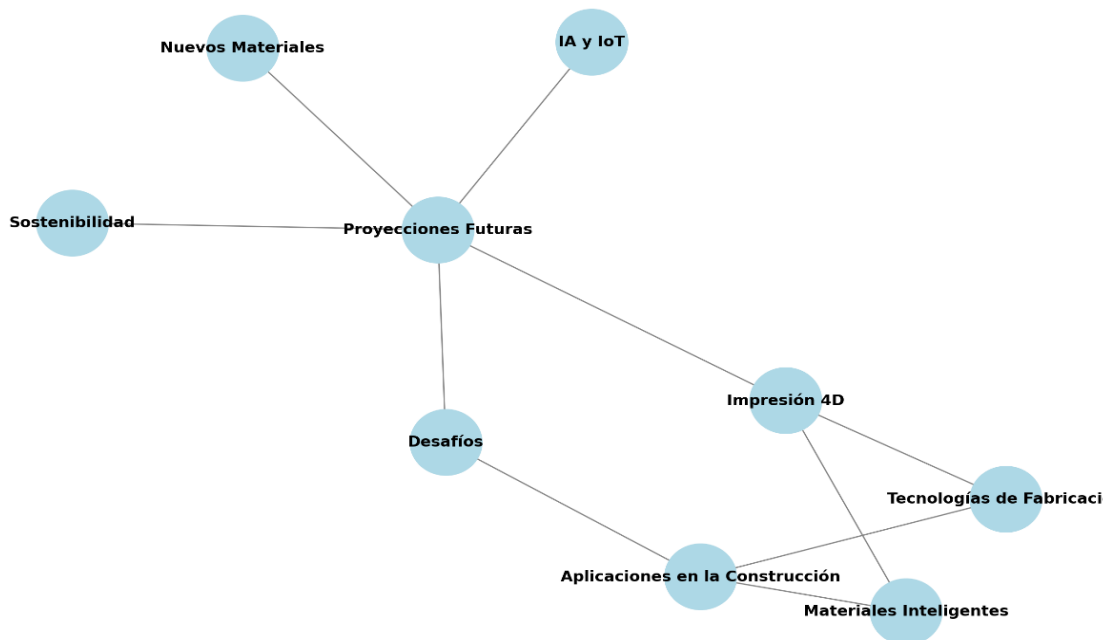
La estructura del artículo se organiza de la siguiente manera: En la primera sección, se presenta una revisión de la evolución de la impresión 4D y su estado actual, con un enfoque en aplicaciones que ya se han implementado o están en fase de desarrollo. A continuación, se exploran las tendencias emergentes que podrían definir el futuro de las estructuras adaptativas, incluyendo avances en materiales inteligentes y tecnologías de fabricación. Luego, se discuten los principales desafíos y barreras que deben superarse para la adopción masiva de la impresión 4D en la construcción. Finalmente, el artículo concluye con una reflexión sobre el impacto potencial de estas tecnologías y se proponen áreas clave para futuras investigaciones (Lyu et al., 2023; Deng et al., 2023; Şahin et al., 2023).

Este enfoque integral no solo contextualiza la relevancia de la impresión 4D en la construcción, sino que también establece un camino claro para la exploración de sus aplicaciones en estructuras adaptativas, posicionando esta tecnología como un catalizador para el futuro de

la construcción sostenible y resiliente. La figura 1 muestra las interconexiones entre los componentes clave de la impresión 4D, incluyendo los materiales inteligentes, las tecnologías de fabricación, las aplicaciones en la construcción, los desafíos que enfrenta, y las proyecciones futuras para esta tecnología y cómo cada uno de estos elementos se relaciona con los demás, proporcionando una visión holística del papel que la impresión 4D podría desempeñar en la transformación de la industria de la construcción.

Figura 1.

Análisis de redes: conexiones clave en la impresión 4D para la construcción



MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo esta revisión del estado del arte sobre la impresión 4D en la construcción con un enfoque en estructuras adaptativas, se siguió un enfoque sistemático que garantizará la exhaustividad y la relevancia de la información recopilada. A continuación, se describen los pasos y criterios utilizados en el proceso de búsqueda, selección y análisis de la literatura científica.

El primer paso en la metodología consistió en definir los términos de búsqueda clave para identificar artículos y estudios relevantes en el ámbito de la impresión 4D. Se utilizaron términos como "impresión 4D", "estructuras adaptativas", "construcción avanzada", "materiales inteligentes", y "tecnologías de fabricación aditiva". Estos términos fueron combinados utilizando operadores booleanos (y, o) para ampliar y afinar los resultados de búsqueda.

La búsqueda de literatura se llevó a cabo en varias bases de datos científicas reconocidas por su relevancia y alcance en los campos de la ingeniería, la arquitectura, y la ciencia de los materiales. Para asegurar la relevancia y la calidad de los estudios seleccionados, se aplicaron varios controles durante el proceso de búsqueda: se limitaron los resultados a artículos publicados en los últimos 5 años (2019-2023) para asegurar que la revisión refleje el estado más reciente y relevante de la tecnología.

Se priorizaron artículos de revistas científicas revisadas por pares, actas de congresos relevantes, y capítulos de libros especializados. Se excluyeron trabajos de divulgación general y

publicaciones no revisadas. Solo se incluyeron estudios publicados en inglés y español para facilitar el análisis y la comparabilidad de la información.

Los estudios identificados fueron evaluados en función de su relevancia para el tema de revisión. Los criterios de selección específicos incluyeron:

- Relevancia temática: solo se seleccionaron estudios que trataran específicamente sobre impresión 4D aplicada a la construcción y/o estructuras adaptativas.
- Contribución al conocimiento: se incluyeron estudios que presentaran avances significativos, nuevos métodos, o aplicaciones innovadoras en el campo de la impresión 4D.
- Calidad metodológica: se revisó la solidez metodológica de los estudios, priorizando aquellos que presentaran datos empíricos, estudios de caso detallados o revisiones exhaustivas del tema.

Una vez seleccionados los estudios relevantes, se procedió a un análisis cualitativo de la información. Este proceso incluyó:

- Extracción de datos: los datos clave de cada estudio, como objetivos, metodología, resultados, y conclusiones, fueron extraídos y organizados en una base de datos para facilitar el análisis comparativo.
- Síntesis temática: los estudios fueron categorizados en temas clave, como "materiales inteligentes", "aplicaciones en construcción", y "desafíos y barreras", para identificar patrones y tendencias comunes.
- Análisis crítico: se realizó un análisis crítico de los estudios seleccionados, evaluando sus aportes al campo y discutiendo sus limitaciones. Este análisis permitió identificar áreas de consenso y controversia, así como vacíos en la literatura que podrían abordarse en futuras investigaciones.
- Integración de resultados: finalmente, los hallazgos se integraron en un marco coherente que resume el estado actual de la impresión 4D en la construcción y su potencial para desarrollar estructuras adaptativas.

Esta metodología asegura una revisión exhaustiva y rigurosa del estado del arte, proporcionando una base sólida para las discusiones prospectivas sobre el futuro de las estructuras adaptativas en la construcción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión documental realizada sobre la impresión 4D en la construcción proporciona un panorama amplio de los avances logrados hasta la fecha, así como de las barreras significativas que aún deben superarse (Kanu et al., 2019). A continuación, se presenta un análisis detallado de los principales hallazgos sobre materiales inteligentes, tecnologías de fabricación, aplicaciones en la construcción y los desafíos identificados para la implementación de la impresión 4D en la industria de la construcción.

Uno de los hallazgos más relevantes es la creciente sofisticación de los materiales inteligentes utilizados en la impresión 4D. Según Bodaghi et al., (2019), los polímeros con memoria de forma han demostrado ser eficaces para crear estructuras que pueden transformarse de manera controlada en respuesta a estímulos ambientales como la temperatura y la luz. Estos materiales permiten que las construcciones sean más dinámicas, optimizando la funcionalidad de edificios y otras estructuras. Por ejemplo, se ha comprobado que estos polímeros son capaces de adaptarse a variaciones en la carga estructural, lo que resulta crucial en zonas con condiciones ambientales fluctuantes (Ayushi et al., 2021).

Champeau et al., (2020) destacaron el uso de hidrogeles, los cuales poseen la capacidad de expandirse y contraerse en respuesta a la humedad. Los autores analizaron cómo estos materiales pueden ser utilizados en fachadas inteligentes, permitiendo que las construcciones se adapten automáticamente a cambios climáticos, lo que reduciría considerablemente el consumo energético en edificios. Este tipo de tecnología tiene el potencial de revolucionar el diseño arquitectónico, especialmente en regiones donde las condiciones meteorológicas extremas imponen desafíos adicionales para el rendimiento energético de los edificios.

Además, se revisaron avances en las tecnologías de fabricación, siendo la impresión directa con tinta uno de los enfoques más prometedores. Wan et al., (2020) explican que esta tecnología permite la creación de estructuras complejas integradas con materiales inteligentes, lo que abre la puerta a aplicaciones personalizadas en la construcción, tales como componentes estructurales que ajustan su forma y función en tiempo real para maximizar la eficiencia energética o la resistencia estructural. Esta capacidad de personalización en la impresión 4D es un avance crucial frente a los métodos tradicionales de fabricación, que a menudo no pueden adaptarse a las necesidades dinámicas de cada proyecto.

La revisión documental mostró que, aunque las aplicaciones de la impresión 4D en la construcción están en una etapa temprana, los estudios experimentales ya han demostrado su potencial en diferentes ámbitos. Noroozi et al., (2020) exploraron la implementación de metaestructuras adaptativas para puentes, revelando que estas estructuras son capaces de ajustarse a las condiciones de carga, lo que mejora la estabilidad y seguridad del puente. En condiciones de tráfico pesado o de cargas dinámicas (por ejemplo, en puentes suspendidos), estas metaestructuras pueden reconfigurar su geometría para distribuir mejor las tensiones, reduciendo así el riesgo de daños y prolongando su vida útil. Estos resultados son un avance importante, ya que el envejecimiento de infraestructuras es un problema crítico en muchas regiones del mundo.

Por otra parte, Zhang et al., (2019) demostraron que las fachadas adaptativas impresas en 4D pueden ajustar su configuración en función de la luz solar y la temperatura exterior, optimizando el confort térmico y reduciendo el uso de sistemas de climatización. Este tipo de fachadas pueden modificar automáticamente su permeabilidad al aire y la luz, permitiendo el paso de más o menos radiación solar según las necesidades del edificio. Los autores mostraron cómo, en climas con grandes variaciones térmicas diurnas, estas fachadas podrían reducir hasta un 30% el consumo energético, contribuyendo así a la sostenibilidad de las construcciones (Cataldi et al., 2022, Kabirian et al., 2022).

Además de las aplicaciones en puentes y fachadas, describen cómo los sistemas adaptativos impresos en 4D también tienen un uso prometedor en la construcción de elementos estructurales inteligentes para edificios. Estos elementos pueden modificar su rigidez o geometría en respuesta a cambios en las condiciones sísmicas o de viento, lo que incrementa la capacidad de los edificios para soportar cargas extremas. Los autores señalaron que la capacidad de las estructuras para adaptarse en tiempo real a estos estímulos podría reducir significativamente el riesgo de colapso durante eventos catastróficos, como terremotos o tormentas.

A pesar de los avances mencionados, la revisión revela que la adopción de la impresión 4D en la construcción enfrenta importantes desafíos técnicos, económicos y normativos (Zhang et al., 2020). Alshebly et al., (2021) destacaron que uno de los principales retos es la durabilidad de los materiales inteligentes en entornos reales. Aunque los polímeros con memoria de forma y los hidrogeles han demostrado ser efectivos en laboratorios y entornos controlados, la exposición prolongada a condiciones externas, como la radiación UV, la humedad constante y las fluctuaciones térmicas, plantea dudas sobre la longevidad de estos materiales. Los estudios revisados sugieren la necesidad de desarrollar materiales más robustos que puedan mantener sus propiedades adaptativas durante ciclos prolongados de uso.

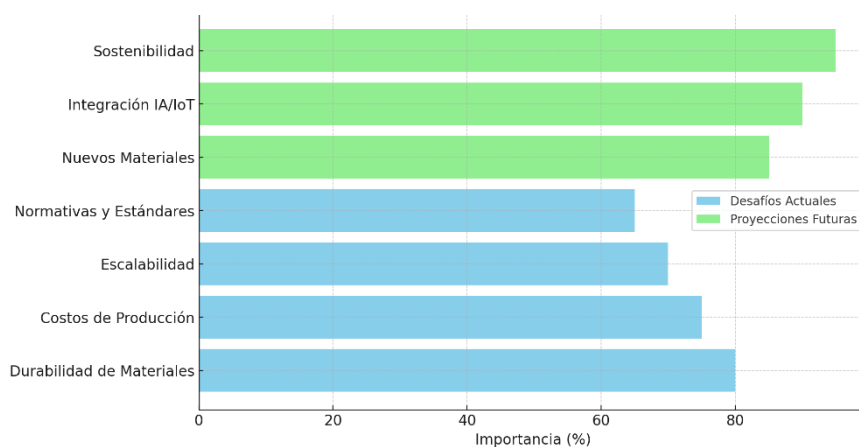
En términos económicos, Ahmed et al., (2021) subrayan que los costos elevados asociados con la fabricación de estructuras adaptativas impresas en 4D son una barrera

significativa. Los costos de producción de los materiales inteligentes y las tecnologías de impresión siguen siendo considerablemente más altos que los métodos tradicionales de construcción. Este factor limita la viabilidad comercial de la impresión 4D, especialmente en proyectos a gran escala, como infraestructura pública o vivienda social.

La figura 2 muestra cómo los desafíos actuales dominan la agenda de investigación y desarrollo, pero también muestra que las proyecciones futuras están centradas en innovaciones que prometen superar estos obstáculos, como el desarrollo de nuevos materiales más duraderos y la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT). (Wang et al., 2023; Lai & Wang, 2023; Antezana et al., 2023; Politakos, 2023; Bodaghi et al., 2023; Thakur et al., 2022; Mahmood et al., 2022; Garcke et al., 2022).

Figura 2.

Comparación de desafíos actuales y proyecciones futuras en la impresión 4D en la construcción



Además, Hunbus y AlMangour (2023) identifican la falta de normativas y estándares como una barrera crítica. Actualmente, no existen regulaciones claras que guíen el diseño, la fabricación y la certificación de estructuras adaptativas impresas en 4D (Joshi et al., 2020). Esto crea incertidumbre en cuanto a la seguridad y viabilidad de implementar estas tecnologías en proyectos comerciales, retrasando su adopción por parte de las empresas constructoras. Sin un marco regulador robusto, es difícil garantizar que las estructuras impresas en 4D cumplan con los estándares de seguridad requeridos para edificaciones a gran escala.

Los estudios revisados sugieren que las futuras investigaciones deben centrarse en superar estos desafíos, especialmente en el desarrollo de nuevos materiales más asequibles y duraderos (Zhang et al., 2022). Wang et al., (2021) proponen que los avances en nanociencia y biotecnología podrían dar lugar a una nueva generación de materiales inteligentes que ofrezcan mejor adaptabilidad a largo plazo y que sean más económicos de producir (Kantaros et al., 2023). Asimismo, la integración de tecnologías como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) promete hacer que los edificios impresos en 4D sean aún más "inteligentes", permitiendo que las estructuras aprendan y optimicen su funcionamiento en tiempo real. Baker et al., (2019), Su et al., (2020) presentaron un flujo de trabajo basado en IA que permite predecir y optimizar el comportamiento de estructuras adaptativas, lo que podría reducir los costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los edificios.

Otra área clave es la sostenibilidad. Los avances en la impresión 4D podrían permitir la creación de estructuras regenerativas que no solo se adapten a su entorno, sino que también contribuyan a la restauración de ecosistemas degradados (Lyu y Wang, 2023; Ren et al., 2021). Esto abriría una nueva vía para la construcción sostenible, donde las estructuras no solo sean

eficientes desde el punto de vista energético, sino que también tengan un impacto positivo en el medio ambiente (Song & Kim, 2020; Jeong et al., 2020; Ramezani & Ripin, 2023; Bora et al., 2023; Vatanparast et al., 2023). La tabla 1 muestra de manera clara las interconexiones entre las innovaciones tecnológicas, las aplicaciones prácticas, y los desafíos que enfrenta la impresión 4D en la construcción.

Tabla 1.

Resumen de aspectos clave en la impresión 4D para estructuras adaptativas en la construcción

Aspecto	Descripción	Ejemplos de aplicación	Desafíos	Referencias clave
Evolución de la Impresión 4D	La impresión 4D se basa en la capacidad de los materiales inteligentes para cambiar de forma en respuesta a estímulos externos. Se ha desarrollado a partir de la impresión 3D, integrando materiales como polímeros con memoria de forma y aleaciones inteligentes.	Utilizada en prototipos de puentes y edificios que pueden adaptarse a las condiciones ambientales, como cambios de temperatura y humedad.	La complejidad en el diseño y la falta de estándares para la implementación en construcción masiva.	Spiegel et al., (2019); Zolfagharian et al., (2020)
Materiales Inteligentes Utilizados	Polímeros con memoria de forma, hidrogeles, y aleaciones que permiten la transformación controlada de estructuras. Estos materiales son cruciales para la adaptabilidad y la durabilidad de las construcciones impresas en 4D.	Fachadas adaptativas que pueden modificar su permeabilidad o geometría según el clima; estructuras internas de edificios que cambian para optimizar la resistencia a las cargas.	Durabilidad a largo plazo y comportamiento bajo condiciones climáticas adversas aún necesitan ser validados.	Bodaghi et al., (2019); Champeau et al., (2020)
Tecnologías de Fabricación	La tecnología de impresión directa con tinta y otras técnicas avanzadas permiten la integración precisa de materiales inteligentes en estructuras complejas, lo que es esencial para aplicaciones	Creación de componentes estructurales con geometrías complejas que pueden ajustarse para maximizar la eficiencia estructural y energética.	Altos costos de producción y desafíos en la escalabilidad para la producción en masa.	Wan et al., (2020); Zhang et al., (2019)

	adaptativas en la construcción.			
Aplicaciones en la Construcción	Las estructuras impresas en 4D han sido aplicadas en proyectos piloto como puentes adaptativos y fachadas inteligentes, donde la capacidad de respuesta a estímulos externos es clave para la eficiencia y sostenibilidad.	Puentes que ajustan su forma bajo cargas dinámicas; fachadas que optimizan la ventilación y luz natural en función del clima.	Limitaciones en la implementación debido a la falta de regulación y costos elevados.	Noroozi et al., (2020); Zhang et al., (2019)
Desafíos y Barreras	Los desafíos incluyen la durabilidad de los materiales bajo condiciones reales, los altos costos de los materiales y tecnologías, y la falta de normativas específicas para guiar la adopción masiva en la construcción.	Mantener la funcionalidad adaptativa en condiciones extremas, como la exposición prolongada a radiación UV o fluctuaciones de temperatura.	Urgencia en el desarrollo de normativas y estándares específicos para la impresión 4D en la construcción.	Alshebly et al., (2021); Hunbus y AIMangour (2023)
Proyecciones Futuras	El desarrollo de nuevos materiales inteligentes, junto con la integración de tecnologías emergentes como IA y sensores IoT, promete transformar la construcción, haciendo posible la creación de edificios verdaderamente inteligentes y sostenibles.	Estructuras regenerativas que no solo se adaptan al entorno, sino que también contribuyen a la restauración de ecosistemas degradados.	La necesidad de investigaciones adicionales para mejorar la asequibilidad y eficiencia de los materiales y tecnologías.	Wang et al. (2021); Su et al., (2020); Lai y Wang (2023)

CONCLUSIONES

En este artículo de revisión, se ha explorado la impresión 4D como una tecnología emergente con el potencial de revolucionar la construcción, especialmente en el desarrollo de estructuras adaptativas (Liu et al., 2019). Las principales contribuciones de este trabajo radican en ofrecer una visión integral y prospectiva del estado del arte en la impresión 4D, destacando tanto los avances tecnológicos como los desafíos que deben ser superados para su implementación masiva en la construcción (Lyu et al., 2023; Chiesa et al., 2023). Este análisis es

particularmente relevante en un contexto donde la sostenibilidad, la eficiencia energética, y la adaptabilidad de las infraestructuras son de creciente importancia.

Las ventajas de la impresión 4D, como se ha discutido, incluyen su capacidad para crear estructuras que pueden adaptarse dinámicamente a su entorno, lo que promete mejorar significativamente la durabilidad y la eficiencia de las construcciones. Esta capacidad es especialmente beneficiosa en la creación de estructuras que pueden responder a condiciones climáticas cambiantes, reducir costos de mantenimiento y aumentar la vida útil de los edificios y puentes. Sin embargo, las limitaciones también son notables: la durabilidad a largo plazo de los materiales inteligentes, los altos costos de producción, y la falta de normativas específicas son barreras importantes que deben ser superadas antes de que esta tecnología pueda ser adoptada a gran escala.

En cuanto a la referencia y aplicaciones de los resultados obtenidos, este trabajo subraya la importancia de continuar la investigación en el desarrollo de nuevos materiales más asequibles y duraderos, así como en la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT) en las estructuras impresas en 4D. Estas innovaciones podrían llevar a la creación de edificios verdaderamente "inteligentes" que no solo se adapten a su entorno, sino que también optimicen su funcionamiento con el tiempo, aprendiendo de su interacción con el entorno (Subeshan et al., 2021).

Las recomendaciones para futuros trabajos incluyen la necesidad de desarrollar estándares y normativas específicas para guiar la adopción segura y efectiva de la impresión 4D en la construcción. Además, se sugiere una mayor colaboración interdisciplinaria para abordar los desafíos técnicos, económicos y normativos que actualmente limitan el potencial de esta tecnología. La investigación futura debería centrarse en validar la durabilidad y fiabilidad de los materiales inteligentes en condiciones reales, así como en reducir los costos asociados con la producción y escalabilidad de las tecnologías de impresión 4D (Shen et al., 2020).

El impacto sobre la comunidad científica de este trabajo es significativo, ya que ofrece un marco de referencia claro para futuras investigaciones y desarrollo en el campo de la impresión 4D. Al proporcionar una visión exhaustiva de los avances actuales y los desafíos por venir, este artículo contribuye a orientar la dirección de futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la construcción, con el objetivo de hacer realidad la promesa de infraestructuras más adaptativas, sostenibles y eficientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, T., Hann, SY, Chiesa, I., Cui, H., Celikkin, N., Micalizzi, S., Barbetta, A., Costantini, M., Esworthy, T., Zhang, LG, De Maria, C. y Maiti, TK (2021). Impresión 4D en aplicaciones biomédicas: tendencias emergentes y tecnologías. *Revista de química de materiales*. B, 9(37), 7608-7632. <https://doi.org/10.1039/d1tb01335a>
- Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H. y Khosla, A. (2021). Impresión 4D: Fundamentos, materiales, aplicaciones y desafíos. *Polímero*. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2021.123926>
- Aldawood, F. (2023). Revisión comprensiva de la impresión 4D: Estado del arte, oportunidades y desafíos. *Actuadores*. <https://doi.org/10.3390/act12030101>
- Alshebly, Y., Nafea, M., Ali, MSM y Almurib, H. (2021). Revisión sobre los avances recientes en la impresión 4D de polímeros con memoria de forma. *Revista europea de polímeros*, 159, 110708. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2021.110708>

- Antezana, P., Municoy, S., Ostapchuk, G., Catalano, PN, Hardy, J., Evelson, P., Orive, G., y Desimone, M. (2023). Impresión 4D: El desarrollo de materiales responsivos utilizando tecnología de impresión 3D. *Farmacia*. <https://www.mdpi.com/1999-4923/15/12/2743>
- Ayushi, Vates, Reino Unido, Mishra, S. y Kanu, Nueva Jersey (2021). Materiales biomiméticos impresos en 4D: una revisión sobre conceptos, oportunidades y desafíos. *Materiales hoy: actas*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.148>
- Baker, AB, Bates, S., Llewellyn-Jones, T., Valori, LPB, Dicker, M., & Trask, R. (2019). Impresión 4D con tr laminados de hidrogel-elastómero de poliuretano robustos. *Materiales y diseño*. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2018.107544>
- Bodaghi, M., Hoa, SV, Gries, T., Le Duigou, A., Tadesse, YT, Yao, L. y Zolfagharian, A. (2023). Enfoque en el diseño de materiales 4D y fabricación aditiva. *Materiales y estructuras inteligentes*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361665X/acfac>
- Bodaghi, M., Noroozi, R., Zolfagharian, A., Fotouhi, M. y Norouzi, S. (2019). Estructuras automorfantes impresas en 4D. *Materiales*, 12, 81353. <https://doi.org/10.3390/ma12081353>
- Bora, LV, Vadaliya, K.S. y Bora, N. (2023). Materias primas sostenibles para la impresión 4D: Una revisión de polímeros biodegradables y recursos naturales para la fabricación sensible a estímulos. *Materiales ecológicos*. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/igrma.23.00039>
- Cataldi, P., Liu, M., Bissett, M. y Kinloch, I. (2022). Revisión sobre la impresión de estructuras inteligentes y de 4D utilizando materiales 2D. *Tecnologías de materiales avanzados*, 7. <https://doi.org/10.1002/admt.202200025>
- Champeau, M., Heinze, D., Viana, T., Rodrigues de Souza, E., Chinellato, A. y Titotto, S. (2020). Impresión 4D de hidrogeles: Una revisión. *Materiales funcionales avanzados*. <https://doi.org/10.1002/adfm.201910606>
- Chiesa, I., Ceccarini, MR, Bon, SB, Codini, M., Beccari, T., Valentini, L., & De María, C. (2023). Impresión 4D de biomateriales híbridos con cambio de forma para aplicaciones avanzadas en bioingeniería. *Materiales*. <https://www.semanticscholar.org/paper/4D-Printing-Shape-Morphing-Hybrid-Biomaterials-for-Chiesa-Ceccarini/aeba186a17d2c76f460fa40e52757fd3fc23e5bf>
- de Kergariou, C., Demoly, F., Perriman, A., Le Duigou, A., & Scarpa, F. (2022). El diseño de higromorfos impresos en 4D: Estado del arte y desafíos futuros. *Materiales funcionales avanzados*. <https://doi.org/10.1002/adfm.202210353>
- Deng, C., Liu, Y., Fan, X., Jiao, B., Zhang, Zhang, M., Chen, F., Gao, H., Deng, L. y Xiong, W. (2023). Impresión láser femtosegundo 4D de micromáquinas inteligentes impulsadas por luz. *Materiales funcionales avanzados*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202211473>

- Garcke, H., Lam, KF, Nurnberg, R. y Signori, A. (2022). Optimización topológica de campo de fase para impresión 4D. *ESAIM: Control, Optimización y Cálculo de Variaciones*.
- Hunbus, A. y AlMangour, B. (2023). Revisión crítica de la construcción utilizando tecnología de impresión 3D. *Revista ASME de ingeniería para edificios y ciudades sostenibles*. <https://doi.org/10.1115/1.4062730>
- Jeong, HY, An, SC, Lim, Y. y Jun, Y. (2020). Impresión 3D y 4D de estructuras multiestables. *Ciencias Aplicadas*. <https://doi.org/10.3390/app10207254>
- Jeong, HY, Lee, E., An, SC, Lim, Y. y Jun, Y. (2020). Impresión 3D y 4D para óptica y metafotónica. *Nanofotónica*, 9, 1139-1160. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0483>
- Joshi, S., Rawat, K., Karunakaran, C., Rajamohan, V., Mathew, AT, Koziol, K., Thakur, V y Balan, C. (2020). Impresión 4D de materiales para el futuro: Oportunidades y desafíos. *Applied Materials Today*, 18, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100490>
- Kabirian, F., Mela, P. y Heying, R. (2022). Aplicaciones de la impresión 4D en el desarrollo de implantes cardiovasculares inteligentes. *Fronteras en bioingeniería y biotecnología*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.873453>
- Kantaros, A., Ganetsos, T. y Piromalis, D. (2023). Impresión 4D: Resumen de tecnología y materiales inteligentes utilizados. *Revista de Mecatrónica y Robótica*. <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2023.1.14>
- Kanu, Nueva Jersey, Gupta, E., Vates, Reino Unido y Singh, G. (2019). Una visión sobre la impresión biomimética 4D. *Avances de RSC*, 9, 38209-38226. <https://doi.org/10.1039/c9ra07342f>
- Lyu, Z., Wang, J. y Chen, Y. (2023). Impresión 4D: Integración interdisciplinaria de materiales inteligentes, diseño estructural y nuevas funcionalidades. *Revista internacional de fabricación extrema*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ace090/pdf>
- Lui, Y., Sow, WT, Tan, LP, Wu, Y., Lai, Y. y Li, H. (2019). Impresión 4D y materiales sensibles a estímulos en aspectos biomédicos. *Acta biomaterialia*, 92, 19-36. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.05.005>
- Mahmood, A., Akram, T., Chen, H. y Chen, S.-X. (2022). Sobre la evolución de las tecnologías de fabricación aditiva (impresión 3D/4D): Materiales, aplicaciones y desafíos. *Polímeros*. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/21/4698>
- Noroozi, R., Bodaghi, M., Jafari, H., Zolfagharian, A. y Fotouhi, M. (2020). Metaestructuras adaptativas con regiones de banda variable mediante impresión 4D. *Polímeros*, 12, 519. <https://doi.org/10.3390/polym12030519>
- Politakos, N. (2023). Copolímeros en bloque en la impresión 3D/4D: Avances y aplicaciones como biomateriales. *Polímeros*. <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/2/322>

- Ramezani, M. y Ripin, ZM (2023). Impresión 4D en ingeniería biomédica: Avances, desafíos y direcciones futuras. Revista de biomateriales funcionales. <https://www.mdpi.com/2079-4983/14/7/347>
- Ren, L., Li, B., Liu, Q., Ren, L., Song, Z., Zhou, X. y Gao, P. (2021). Impresión 4D de estructura bilaminada dualmente sensible a estímulos hacia múltiples cambios de forma. Fronteras en materiales. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.655160>
- Şahin, E., Cheng, T., Wood, D., Tahouni, Y., Poppinga, S., Thielen, M., Speck, T., y Menges, A. (2023). Impresión 4D de sección transversal: Ampliación de estructuras auto-moldeables con propiedades de material diferenciadas inspiradas por la Pinguicula grandiflora. Biomimética. <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/2/233>
- Shen, B., Erol, O., Fang, L. y Kang, S. (2020). Programando el tiempo en la impresión 3D: avances actuales y direcciones futuras en la impresión 4D. Materiales multifuncionales, 3. <https://doi.org/10.1088/2399-7532/ab54ea>
- Song, H. y Kim, J. (2020). Impresión 4D con materiales y estructuras inteligentes. Ceramista, 23 años, 27-37. <https://doi.org/10.31613/ceramist.2020.23.1.07>
- Spiegel, CA, Hippler, M., Münchinger, A., Bastmeyer, M., Barner-Kowollik, C., Wegener, M. y Blasco, E. (2019). Impresión 4D a microescala. Materiales funcionales avanzados. <https://doi.org/10.1002/adfm.201907615>
- Subeshan, B., Baddam, Y. y Asmatulu, E. (2021). Progreso actual de la tecnología de impresión 4D. Progreso en la fabricación aditiva, 6, 495-516. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00182-6>
- Su, JW, Li, D., Xie, Y., Zhou, T., Gao, W., Deng, H., Xin, M. y Lin, J. (2020). Un flujo de trabajo de aprendizaje automático para la impresión 4D: comprender y predecir comportamientos de transformación de estructuras activas impresas. Materiales y estructuras inteligentes, 30. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abc836>
- Thakur, A., Vates, Reino Unido y Mishra, S. (2022). Impresión 4D utilizando PLA polimérico con memoria de forma: Una revisión del estado del arte. 2022 2da Conferencia Internacional sobre Avances Tecnológicos en Ciencias Computacionales (ICTACS). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9988604>
- Vatanparast, S., Boschetto, A., Bottini, L. y Gaudenzi, P. (2023). Nuevas tendencias en impresión 4D: Una revisión crítica. Ciencias Aplicadas. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7744>
- Wan, X., Luo, L., Liu, Y. y Leng, J. (2020). Impresión directa con tinta basada en impresión 4D de materiales y sus aplicaciones. Ciencia avanzada, 7. <https://doi.org/10.1002/advs.202001000>
- Wang, J., Zhang, Y., Zheng, J., Zhao, X., Guo, H., Qiu, Y., Wang, X., Liu, L. y Yu, H. (2023). Una estrategia de diseño inverso de impresión 4D para micromáquinas con morfología de forma personalizada. Pequeño. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.202302656>

- Wang, Y., Cui, H., Esworthy, T., Mei, D., Wang, Y. y Zhang, LG (2021). Estrategias emergentes de impresión 4D para la próxima generación de regeneración de tejidos y dispositivos médicos. *Materiales avanzados*, 34. <https://doi.org/10.1002/adma.202109198>
- Zhang, C., Cai, D., Liao, P., Su, JW, Deng, H., Vardhanabhuti, B., Ulery, B., Chen, SY y Lin, J. (2020). Impresión 4D de andamios poliméricos con memoria de forma para implantación biomédica adaptativa. *Acta biomateriales*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.12.042>
- Zhang, W., Ge, Z. y Li, D. (2022). Evolución y tendencias emergentes de la impresión 4D: Un análisis bibliométrico. *Revisión de fabricación*. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2022028>
- Zhang, Z., Demir, KG y Gu, GX (2019). Avances en la impresión 4D: una revisión sobre materiales inteligentes actuales, tecnologías y aplicaciones. *Revista internacional de materiales inteligentes y nanomateriales*, 10, 205-224. <https://doi.org/10.1080/19475411.2019.1591541>