



BARRERAS Y CASOS DE USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN



Plataforma Tecnológica Española
de Construcción

Líderes



Coordinadores del contenido de los apartados



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



I+D+Arq
ARCHITECTURAL RESEARCH GROUP



GITECO
UC UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA



tecna:a

MEMBER OF BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE

Colaboradores



ÍNDICE

A ESTADO DEL ARTE.....	3
A.1 INTRODUCCIÓN	4
A.2 INICIATIVAS EXISTENTES.....	7
B BÚSQUEDA DE BENEFICIO / COSTE	14
B.1 FACTORES TÉCNICOS.....	14
B.2 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN.....	16
C TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS DISPONIBLES	19
C.1 IMPRESORAS 3D EN LA CONSTRUCCIÓN	19
D MATERIALES UTILIZADOS EN FABRICACIÓN ADITIVA /IMPRESIÓN 3D ACTUALMENTE Y EN DESARROLLO	22
D.1 POLÍMEROS (FDM).....	22
D.2 MORTEROS Y MICROHORMIGONES	23
D.3 YESO	24
D.4 ARCILLAS/BARRO.....	24
D.5 METALES	24
D.6 MATERIALES SOSTENIBLES (GEOPOLÍMEROS) Y CEMENTOS DE BAJO CONTENIDO EN CLÍNKER ..	25
E NORMATIVA.....	27
F RETOS, LIMITACIONES Y TENDENCIAS	30
F.1 RETOS Y LIMITACIONES	31
F.1.1 Normativa y estandarización	32
F.1.2 Sostenibilidad de los materiales empleados en FA.....	32
F.1.3 Adherencia entre capas del material extruido	32
F.1.4 Metodologías para la integración de refuerzos en la construcción	32
F.1.5 Integración de sistemas de FA con los sistemas constructivos actuales.....	33
F.1.6 Integración entre arte, diseño y adaptación a las necesidades del usuario.....	33
F.1.7 Integración de sistemas BIM para el modelado de edificios y futura reproducción del modelo virtual con sistemas de FA.....	34
F.1.8 Tamaño condicionado por el sistema de impresión	34
F.1.9 Impresión multimaterial.....	34
F.1.10 Impresión de elementos no verticales	34
F.2 TENDENCIAS	35
F.2.1 Nuevos sistemas constructivos mediante FA.....	35
F.2.2 Nuevos procesos productivos en la construcción	36
G CONCLUSIONES.....	37
H BIBLIOGRAFÍA.....	38

A ESTADO DEL ARTE

En los últimos años se están viviendo importantes cambios en los procesos productivos tanto desde un punto de vista técnico (en cuanto a calidad, productividad y calidad) como desde la perspectiva del impacto ambiental (consumo de materiales y energía, reutilización de residuos, etc.) y la economía circular.

Por otro lado, las tecnologías avanzadas de fabricación basadas en procesos de impresión 3D están entrando cada vez con más fuerza en todos los sectores industriales gracias al innumerable abanico de ventajas que llevan asociadas tales como: libertad geométrica y de diseño, reducción de costes, minimización del uso de materiales, reducción del tiempo de puesta en el mercado o gran flexibilidad productiva.

Uno de los sectores con mayor potencial en las economías a nivel global es el de la construcción y, sin embargo, sigue siendo una de las industrias con las ratios de productividad más bajos respecto a otros sectores industriales y de la economía en general. Así pues, en el año 1995 la productividad en la industria, en la construcción y en la economía en general estaban a la par, pero la evolución en el tiempo ha dejado relegado al sector constructivo al último lugar con ratios de productividad del entorno del 60% respecto a la industria, y a un 70% de la economía en general.

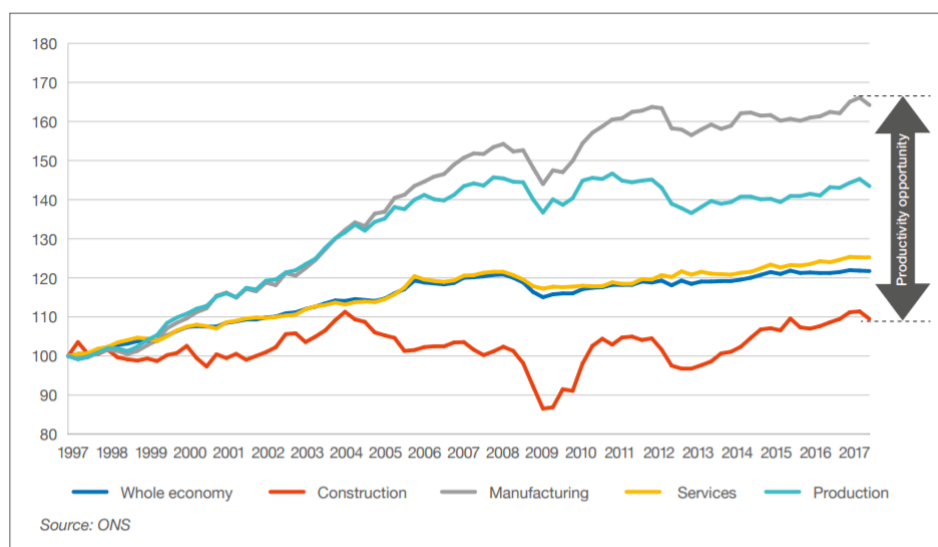


Figura 1. Evolución de la productividad en el sector de la construcción (Fuente "ONS")

En este marco, se ha identificado la fabricación aditiva como una tecnología de alto valor para mejorar las capacidades, productividad y competitividad del sector, oponiéndose a la técnica de fabricación tradicional conocida como fabricación sustractiva. De hecho, dado que la impresión 3D tiene una amplia gama de aplicaciones, en los últimos años, se ha incrementado notablemente el número de sectores en los que se está integrando y aplicando la tecnología. La disminución de los costes y los avances tecnológicos han permitido que comercialmente sea más viable. Sin embargo, el sector de la construcción

podría considerarse como muy tradicional y apenas ha adoptado sistemas digitales o avances tecnológicos.

A.1 Introducción

Dentro de los procesos que se han automatizado y robotizado en la construcción, la fabricación aditiva mediante impresión 3D usando diversos materiales constructivos ha suscitado una gran expectación en los últimos años debido a sus posibilidades en cuanto a flexibilidad y rapidez.

Se puede definir como **Fabricación Aditiva**, habitualmente denominada como **Impresión 3D**, “el proceso de unión de materiales para realizar objetos desde un modelo de datos 3D, generalmente capa a capa, como oposición a los métodos de fabricación por sustracción tradicionales”¹.

Básicamente la impresión 3D en la construcción es la combinación del diseño por ordenador con procesos de extrusión y relleno. Los principales materiales empleados en la impresión son: hormigón, yeso, materiales híbridos junto con diferentes aditivos y fibras y cerámicas.



Fuente: ICON



Fuente: COBOD



Fuente: Apis Cor



Fuente: WASP y Mario Cucinella Architects

Figura 2. Ejemplos de aplicaciones de los sistemas de impresión 3D en la construcción.

¹ ASTM F2792-12a (2012), Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.

La impresión 3D, o la fabricación aditiva en sí misma, no es una tecnología nueva ya que se remonta a la década de 1980. Desde su origen, la impresión 3D se ha utilizado, principalmente, en el sector de la fabricación, para producir prototipos o piezas con bajos volúmenes de producción, piezas de pequeño tamaño y diseños complejos².

La fabricación de un modelo o prototipo tridimensional a partir de un diseño asistido por computadora mediante la adición de capas de material es ahora una práctica estándar en muchas industrias, desde la aeroespacial y la arquitectura hasta la fabricación médica y de alta gama. La consultora McKinsey estima que esta tecnología podría tener un impacto económico anual de 550.000 millones de dólares para el año 2025. Sin embargo, la impresión 3D en el sector de la construcción está resultando un reto importante.

En cualquier caso, aunque en menor medida, la fabricación aditiva también está ganando terreno en la construcción. El potencial para mejorar los métodos de construcción actuales es significativo y la impresión 3D en particular significará un cambio radical en los procesos de construcción.

Los informes indican que la tecnología de impresión 3D puede proporcionar ahorros de energía de hasta un 40%, reducir los costes de construcción entre un 50% y un 70% y puede reducir los costes laborales entre un 50% y un 80%. Además, esta tecnología ayudará a reducir los residuos producidos en las operaciones de construcción hasta en un 60%, lo que repercutirá positivamente en los beneficios económicos del sector y contribuirá al desarrollo sostenible.

Entre sus ventajas más importantes, como ya se ha comentado, están la flexibilidad de este tipo de soluciones que permiten adaptarse rápidamente a nuevos diseños reduciendo de forma drástica el número de acciones intermedias desde el entorno BIM hasta la obra. Otra de las ventajas es la mínima cantidad de residuos que se generan con este tipo de sistemas con las consiguientes ventajas medioambientales. Y además en algunos casos, como el planteado en esta propuesta, pueden conseguirse sistemas portátiles que permiten imprimir a pie de obra reduciendo las necesidades de transporte de los elementos prefabricados y aumentando la rapidez de respuesta. Es evidente, por tanto, que el desarrollo de esta tecnología cubre unas necesidades específicas que resultan de interés en el sector de la construcción.

Dado que casi no hay economías de escala en la fabricación aditiva, la tecnología es ideal para producciones de poco volumen o para la personalización masiva de componentes acabados (millones de implantes dentales y audífonos ya están hechos con esta tecnología). Liberada de las restricciones de las fábricas tradicionales, la fabricación aditiva permite a los diseñadores hacer cosas que antes eran consideradas económicamente demasiado complejas de producir. Por ejemplo, permite hacer en un solo bloque piezas que antes se tenían que producir por separado y ser montadas y remachadas, con el

² B. Berman: "3-D printing: The new industrial revolution". Business Horizons, 55 (2), 155–162, 2012.

consecuente ahorro de tiempo. También ahorra materiales, puesto que evita rechazos, cosa que es importante en materiales caros como el titanio.

No obstante, el uso de tecnología de impresión 3D en la industria de la construcción se encuentra todavía en una etapa temprana de desarrollo ³. Existen algunas limitaciones y problemas, **como costos elevados, problemas de resolución** (es decir, una calidad de **superficie deficiente con salidas rugosas y gruesas**, lo que resulta en **una precisión dimensional reducida**) y un **tiempo de producción prolongado porque la velocidad de impresión se ve comprometida por la escala**. Así, algunos de los **obstáculos para la impresión 3D** desarrollados este documento son:

- **La disponibilidad, estandarización y certificación de materiales de impresión.**
- **Métodos de diseño adecuados para superar las limitaciones de la AM.**
- La alta inversión inicial en comparación con otros métodos de producción.
- **La legislación existente y la falta de un conjunto completo de estándares para la impresión 3D, con certificación y normalización considerados elementos clave.**

A su vez, a pesar de todos los beneficios identificados y de haber pasado ya varios años desde los comienzos de la fabricación aditiva, su aplicación en la industria de la construcción no ha alcanzado aún su verdadero potencial, quedándose en un número reducido de proyectos de demostración. Aunque se encuentran desarrolladas en los apartados específicos, algunas de las principales razones son⁴:

- (1) **Las técnicas de impresión 3D actualmente disponibles no se han diseñado para la fabricación de componentes de gran tamaño.**
- (2) **Limitaciones** en relación a la disponibilidad y conocimiento del desarrollo de los **materiales de impresión.**
- (3) Falta de disponibilidad de **materiales con comportamiento robusto para hacerlos viables industrialmente.**
- (4) Necesidad de emplear armadura en muchos de los elementos constructivos.
- (5) **Falta de normativa.**
- (6) Aspectos económicos, asociados al coste de los equipos (impresoras) necesarios.
- (7) Necesidad de personal especializado integrado en el sector.

³ The Application of 3D-Printing Techniques in the Manufacturing of Cement-Based Construction Products and Experiences Based on the Assessment of Such Products. Guillermo Sotorrío Ortega, Javier Alonso Madrid, Nils O. E. Olsson and José Antonio Tenorio Ríos. Buildings, 2020

⁴ Hamidi, F., & Aslani, F. (2019). Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. Construction and Building Materials, 218, 582-609.

A.2 Iniciativas existentes

El sector de la construcción es un sector que se podría llamar tradicional y apenas ha adoptado sistemas digitales o avances tecnológicos.

Ampliando la información de los informes de la EU5, en el caso de la impresión 3D supone integrar la fabricación digital, nuevas herramientas, nuevos procesos y capacidades de sus recursos. La adopción de la impresión 3D en la industria de la construcción genera una atención cada vez mayor por parte de los responsables políticos y la industria. La impresión 3D lo convierte en un "ajuste natural con la construcción", como se muestra en el cuadro adjunto.

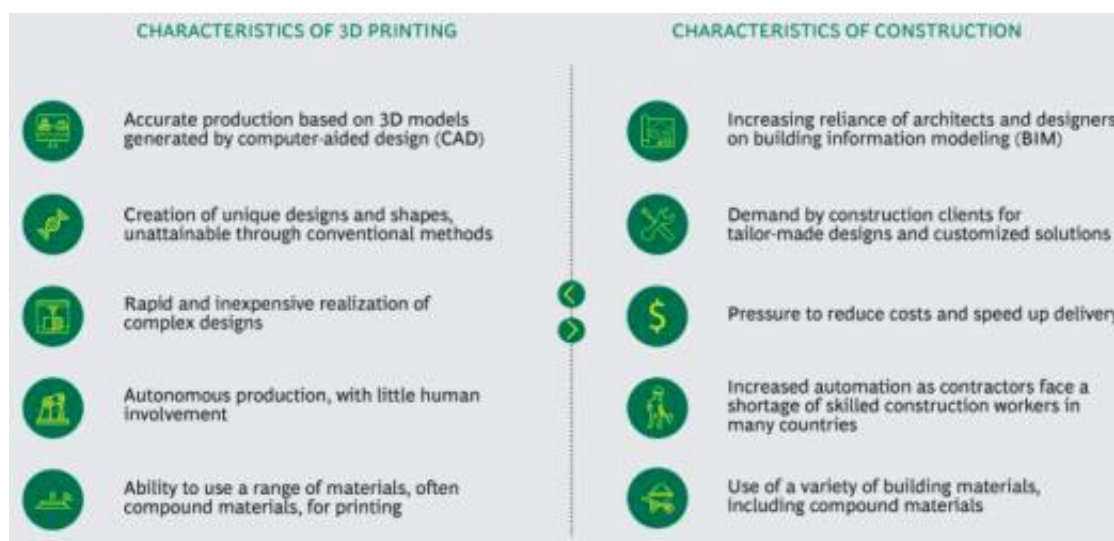


Figura 3. Comparación de características de la impresión 3D y la construcción tradicional (Fuente: BCG, 2018)

Áreas de aplicación de la impresión 3D

Las innovaciones en fabricación digital hasta ahora se han producido principalmente en el diseño, la ingeniería y las operaciones y fases de mantenimiento de la construcción, la impresión 3D se refiere principalmente a la fase de construcción real. De hecho, la impresión se ha aplicado para construir (en su mayoría a pequeña escala) edificios, puentes, moldes impresos, componentes, maquetas arquitectónicas y diseño de interiores. También se puede distinguir principalmente entre dos líneas de trabajo: Impresión "In Situ" y impresión "prefabricada".

Tabla 1. Ejemplos de áreas de aplicación y tipologías de impresión 3D

⁵ Integrating digital innovations in the construction sector, European observatory.

Área de aplicación	Tipología	Ejemplos
Edificios	Casas unifamiliares compactas; vivienda social, edificio de oficinas	• Proyecto Yhnova en Nantes, Francia para construir vivienda social • Cinco casas impresas en 3D en Eindhoven, Países Bajos • Edificio impreso en 3D en Copenhague, Dinamarca • Edificio de oficinas de la Dubai Future Foundation
Puentes	Puentes peatonales y ciclistas Puentes	• Pasarela impresa en 3D en Madrid, España • Pasarela impresa en 3D en Ámsterdam, Países Bajos • Puente ciclista impreso en 3D en Ámsterdam, Países Bajos
Moldes impresos	Diseño y forma únicos (es decir, objetos no estándar)	• Panel de pared de doble curvatura para el Proyecto London Crossrail • Proyecto Hilo en Dübendorf, Suiza
Componentes de construcción	Fachadas, juntas, tabiques, tomas de corriente	• Red de acero de la cubierta del techo para edificio Bevis Marks en la ciudad de Londres
Maquetas arquitectónicas	Modelos a pequeña escala	• Sagrada Familia, Barcelona, España • Pared impresa en 3D de IKEA • Omedelbar Sillón de mano o tejido
Diseño de interiores	Diseño de interiores y mobiliario	• Decoración de pared impresa en 3D de Steelcase • Sillas Eiffel de Ventury

Proyectos de Impresión 3D aplicados al sector construcción

Existen varias iniciativas nacionales e internacionales centradas en el desarrollo de sistemas de impresión 3D aplicados al sector de la construcción. Aunque esta tecnología, dentro de este sector, está en sus inicios, y hasta ahora la mayoría de las aplicaciones han sido pruebas de concepto, es esperable que se use de forma más generalizada en los próximos años/décadas.

La compañía Win Sun Decoration Design Engineering, por ejemplo, construye edificios y casas con las distintas partes prefabricadas en hormigón reciclado mediante “Contour Crafting”. Esta empresa ha imprimido con esta tecnología partes de un edificio de seis pisos y una casa tipo villa construidos en Shangai.

Otro ejemplo de las posibilidades de esta técnica son las diez pequeñas casas construidas, según WinSun, en menos de 24 horas mediante elementos prefabricados.

Total, Kustom (TK) es una empresa con sede en EE. UU. En enero de 2015, su fundador, Andrey Rudenko, pudo producir una pequeña estructura de hormigón en forma de castillo utilizando una impresora 3D hecha a medida. Más tarde, pudo aplicar su tecnología a la realización de una suite de hotel en Filipinas. Aunque no está completamente industrializado, Total Kustom atrae una atención considerable debido a la calidad de sus productos (<http://www.totalkustom.com/>).

Hay un número creciente de empresas que están entrando en este mercado. Creada en 2016, Apis Cor completó recientemente un edificio administrativo de dos pisos para el Ayuntamiento de Dubai. Con una altura de 9,5 metros y una superficie de 640 metros cuadrados, es el edificio impreso en 3D más grande hasta la fecha. Dado el tamaño del proyecto, una grúa reposicionó la máquina multieje durante todo el proceso para completar las diferentes áreas del edificio (<https://www.apis-cor.com>).



Figura 4. Edificio de dos pisos impreso en Dubai (Imágenes cortesía de Apis Cor)

Dubái se ha comprometido con esta tecnología y, en 2016, el gobierno anunció su estrategia de impresión 3D, que apunta a que el 25% de todos los edificios nuevos de la ciudad se construyan con esta tecnología para 2030 (<https://ovacen.com/dubai-imprimir-3d-edificios>).

La empresa italiana WASP ha desarrollado una impresora 3D CRANE WASP y procesos de construcción basados en los principios de la economía circular, para crear casas impresas en 3D con materiales reutilizables y reciclables, provenientes de suelo local, neutro en carbono y adaptable a cualquier clima y contexto.



Figura 5. Casa eco-sostenible impresa en 3D - Tecla en Massa Lombarda (Ravenna, Italia) (Imágenes cortesía de WASP)

Con sede en los Países Bajos y fundada en 2013, CyBe Construction es otro pionero en la impresión 3D robótica. Ha desarrollado el "R 3Dp", que es un sistema modular basado en un robot de seis ejes que puede imprimir hormigón a una velocidad de 200 mm/s. El "RC 3Dp" es una versión móvil, montada sobre rieles. En 2017, la empresa utilizó su robot 3Dp RC para imprimir un laboratorio de investigación en Dubai, que constaba de 27 elementos separados y cubría un área de 168 m² y se completó en solo tres semanas (<https://cybe.eu>).

BetAbram (BA) es otra empresa, con sede en Eslovenia, que ha desarrollado varias impresoras de hormigón. La estructura de la impresora es un robot pórtico movido sobre rieles y con una capacidad de carga de 100 kg (<http://betabram.com/p3specs.html>).

La universidad de Eindhoven ha sido también pionera desde el principio trabajando con el contour crafting haciendo prefabricados de hormigón de alta resistencia para obra civil.

A destacar es el proyecto Olympus (<https://www.iconbuild.com/technology/space>) que está llevando a cabo la empresa ICON junto con el Estudio BIG y el centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA. Están haciendo pruebas de impresión y procesos utilizando materiales similares a los presentes en el suelo lunar. Las pruebas ayudarán a diseñar, desarrollar y demostrar prototipos para un posible sistema futuro de construcción aditiva a gran escala que podría imprimir infraestructuras en la Luna.

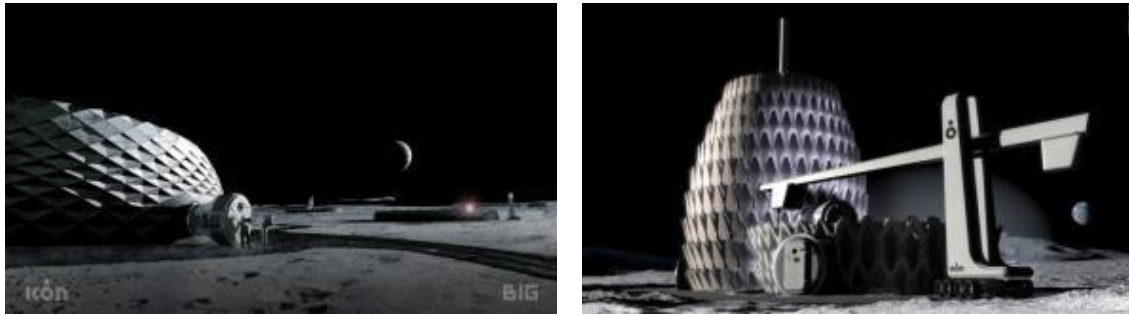


Figura 6. Proyecto Olympus (Imágenes cortesía de ICON)

Otros proyectos interesantes en esta temática son los llevados a cabo por el Instituto de Arquitectura Avanzada de la Universidad de Cataluña (www.iaac.net). Como el proyecto *Pylos* para la optimización de la mezcla del material extrusionado, el proyecto *Mataerial* para el desarrollo de aditivos que ayuden a resolver el problema de la gravedad en la impresión en paredes verticales, y el proyecto *Minibuilders*, un innovador proyecto en el que se emplea pequeños robots que pueden construir grandes estructuras.

Por otro lado, la empresa holandesa MX3D planea aplicar procesos aditivos para la construcción de una pasarela peatonal sobre uno de los canales en Amsterdam.



Figura 7. Pasarela peatonal y prueba de concepto (Imágenes cortesía de MX3D)

Finalmente, la siguiente tabla recopila las principales entidades que trabajan en sistemas de impresión 3D en el sector de la construcción.

Tabla 2. Entidades relevantes en sistemas de impresión 3D en la construcción

Página Web de la entidad	País
https://cobod.com/	Dinamarca
https://betabram.com/	Eslovenia
https://cybe.eu/	Países bajos
https://www.3dprintedhouse.nl/en/	Países bajos
https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-design/3d-concrete-printing/	Países bajos
https://www.vertico.xyz/	Países bajos
https://mx3d.com/	Países bajos
https://www.bam.com/en/press/press-releases/2019/1/bam-and-weber-beamix-jointly-operate-europes-first-industrial-3d	Países bajos
https://www.constructions-3d.com/	Francia
https://xtreee.com/	Francia
https://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp/	Reino Unido
https://www.bam.co.uk/media-centre/news-details/a-world-first-the-first-fully-3d-printed-structurally-pre-stressed-concrete-cycle-bridge-in-the-world	Reino Unido
https://www.media.mit.edu/	USA
https://www.iconbuild.com/	USA
https://www.mudbots.com/	USA
http://www.totalkustom.com/	USA
https://www.apis-cor.com/	USA / Rusia
http://contourcrafting.com/	USA
https://www.sq4d.com/	USA
https://www.apis-cor.com/	USA
https://dshape.wordpress.com/	USA
https://www.xtreee.eu/	Francia
https://www.constructions-3d.com/	Francia
https://www.3dwasp.com/en/	Italia
http://www.winsun3d.com/En/	China
https://www.twente-am.com/	Canadá
https://3d.besix.com/	Dubái
https://www.14trees.com/	África

https://printedfarms.com/	
https://bemore3d.com/language/en/home/	España
https://a3dprinter.es/	España
https://www.idonial.com/es/	España
https://www.cartif.es/	España
https://www.vias.es/	España
https://web.unican.es/	España
https://www.tecnalia.com/	España
https://www.placo.es/	España
https://www.ietcc.csic.es/es/	España
https://www.acciona.com/	España
http://atanga.net/	España
http://www.tpfiningenieria.com/	España
https://www.ceit.es/	España
http://www.uned.es/	España
https://www.uc3m.es/Inicio	España
https://www.upc.edu/es	España
http://unicartagena.edu.co/	España
www.upm.es	España
https://www.uva.es	España
www.upc.edu	España
https://ovacen.com/hormigon-translucido/	España
https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-12722-vigas-impresas-es.html	España
https://www.cementoscruz.com/	España

B BÚSQUEDA DE BENEFICIO / COSTE

B.1 Factores técnicos

Uno de los aspectos clave de la implementación de tecnología avanzadas de fabricación aditiva en la industria de la construcción, es una mejora de la competitividad y en consecuencia el maximizar la ratio beneficio/coste.

En este ámbito existen una serie de aspectos técnicos (tal y como se expone a continuación), relacionados con el proceso de impresión 3D, que hacen que este tipo de tecnologías sean competitivas desde el punto de vista económico frente a los procesos constructivos convencionales.

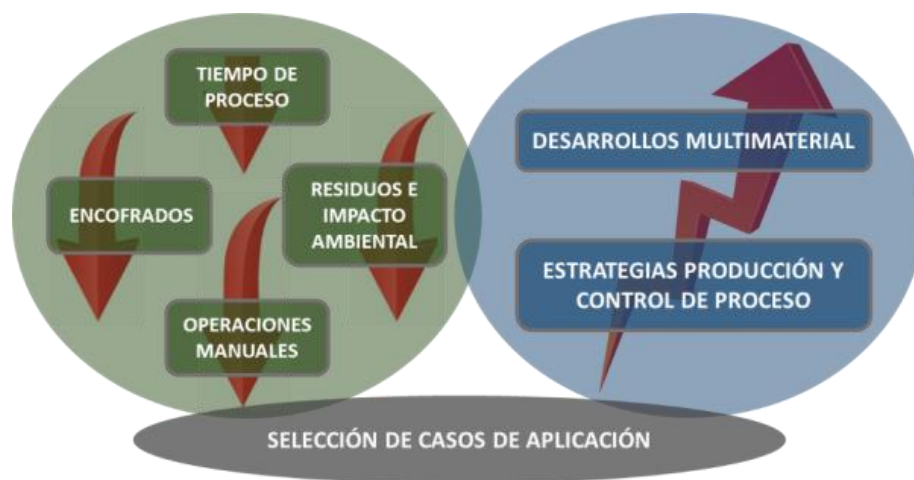


Figura 8. Aspectos clave en la mejora de la ratio beneficio/coste a través de la impresión 3D en construcción.

Reducción de los tiempos de proceso.

Originalmente, la impresión 3D fue desarrollada con el objetivo principal de reducir los plazos y costes para el desarrollo de prototipos. Décadas atrás, la limitación de herramientas de software disponibles paralizó el desarrollo de la fabricación aditiva. Sin embargo, en este momento, el contar con tecnologías avanzadas de producción integradas en sistemas robotizados de diversa naturaleza permite trabajar con ratios de producción elevados, minimizando, de este modo, los tiempos totales de proceso. Los equipos de impresión 3D existentes para la industria de la construcción se caracterizan por velocidades de proceso elevadas, contando con velocidades de avance lineal que pueden llegar hasta los 400m/h y volúmenes de hasta 3m³/h de capas impresas.



Figura 9. Detalle de la velocidad productiva de un sistema cartesiano de impresión 3D a gran escala. (Fuente:IDONIAL)

Eliminación o reducción del uso de encofrados.

Intrínseco a los procesos de fabricación aditiva está la capacidad de generar elementos tridimensionales a partir de un archivo digital sin necesidad del uso de moldes o utillajes. En el caso de su aplicación a la industria constructiva esto se traduce en una reducción drástica de una de las tareas más laboriosas dentro del sector como es la fabricación de moldes, mediante encofrado, que recogen el hormigón/mortero durante su proceso de fraguado inicial. El tiempo dedicado al montaje y desmontaje de estas estructuras, en la mayoría de los casos es muy superior al tiempo de vertido del material fresco. La eliminación, total o parcial, de los encofrados reduce, drásticamente, los tiempos de proceso, así como todos los gastos asociados de personal y transporte de materiales asociados. Por consiguiente, esta tecnología permite producir estructuras muy complejas a costos inferiores y con menor desperdicio, con las ventajas económicas que esto conlleva.

Reducción de las operaciones manuales.

Los sistemas de impresión 3D a gran escala, para construcción, se basan en sistemas robóticos avanzados que funcionan de manera semiautónoma, lo que reduce en gran medida las operaciones manuales y permite una distribución del personal en la realización de otras tareas y un ahorro de costes en el propio proceso.



Figura 10. Trabajo manual convencional (Izquierda). Proceso automatizado de impresión 3D (derecha). (Fuente BeMore 3D)

Reducción de residuos e impacto ambiental.

Uno de los aspectos que caracteriza a la fabricación aditiva es que el material es añadido selectivamente optimizando, de este modo, el consumo de materiales y de recursos energéticos. De este modo se reduce la generación de residuos y el impacto ambiental asociado.

Desarrollos multimaterial

Los procesos de impresión 3D permiten el desarrollo de componentes multimaterial, de tal modo que se puede seleccionar en que partes o elementos se incluyen materiales de alto valor añadido y coste y que partes se podrían integrar materiales económicos, reciclados, etc. con el consiguiente ahorro de costes.

Estrategias de producción y control de proceso

La tecnología de impresión 3D permite diseñar y desarrollar procesos productivos específicos optimizados que permiten reducir tanto los tiempos de proceso como los consumos de materiales y recursos energéticos.

Fabricación en masa de piezas únicas

Fabricación en masa de piezas únicas, a la carta o a medida (customización en masa), gracias a que esta tecnología permite adaptarse a las condiciones geométricas del entorno sin sobrecoste alguno.

B.2 Análisis y evaluación

Las ventajas económicas y de productividad expuestas en el punto anterior han sido estudiadas y evaluadas a nivel piloto, del modo que se expone a continuación. En este caso se hace el análisis de la fabricación de un pilar y una viga por método convencional frente a un proceso de impresión 3D.

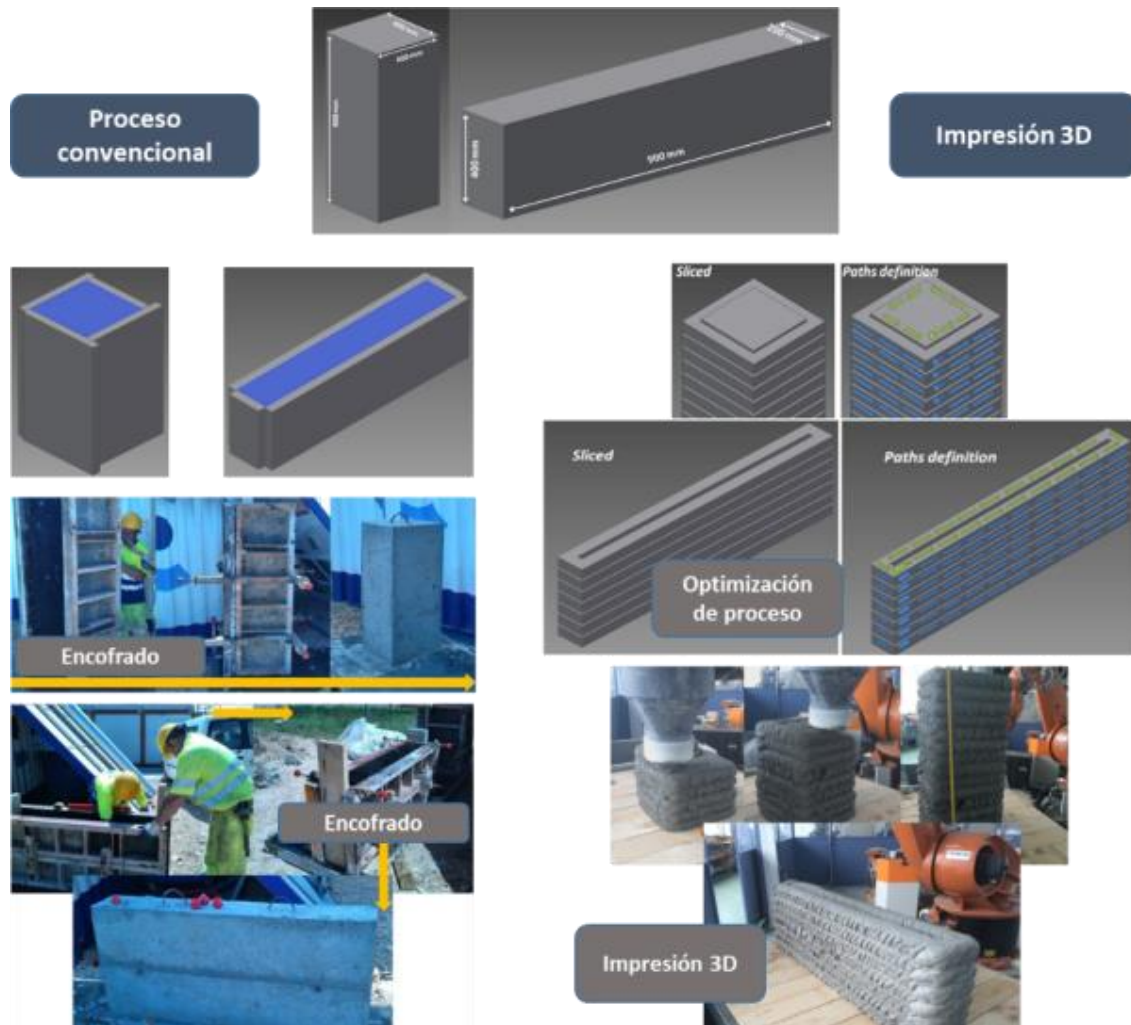


Figura 11. Detalle de un estudio piloto sobre el proceso de impresión de elementos constructivos. (Fuente: IDONIAL)

Este análisis empírico arroja resultados positivos sobre las ventajas que la impresión 3D tiene para el sector de la construcción y su positivo impacto en los costes productivos. El siguiente diagrama, resume de manera esquemática las diferencias, porcentuales entre el proceso convencional y la fabricación aditiva:

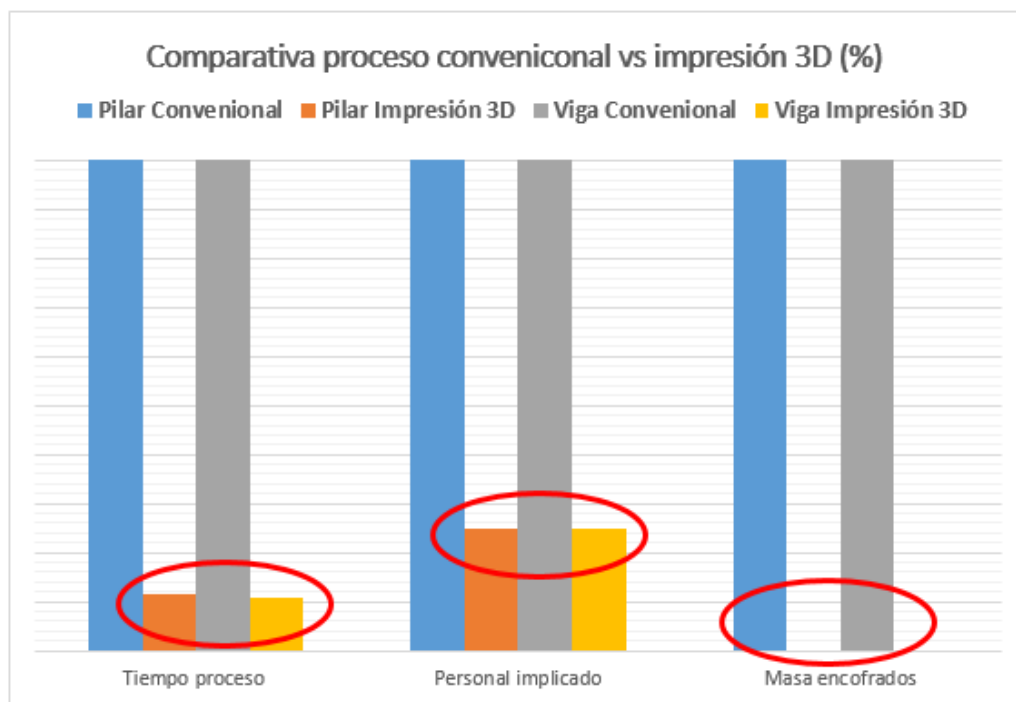


Figura 12. Ventajas de proceso entre la fabricación aditiva y la convencional, a nivel piloto.

A la vista del gráfico, quedan patentes aspectos como la reducción de tiempo de proceso en más del 80%, la disminución de las operaciones manuales en un 75% y en este caso la reducción del uso de encofrado en un 100%.

C TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Respecto a las tecnologías de los sistemas de impresión 3D podemos distinguir entre la propia impresora y los materiales a imprimir.

C.1 Impresoras 3D en la construcción

Se puede considerar que una impresora 3D de construcción es básicamente un robot industrial ya que un robot es un dispositivo electromecánico que es capaz de realizar determinadas tareas, de acuerdo con unas instrucciones previamente programadas.

Hay varias formas de clasificar los robots: por el entorno de trabajo (industriales o de servicios); o más específicamente por el tipo de aplicación (médicos, educacionales, militares, domésticos); por el medio en el que trabajan (terrestres, aéreos, submarinos, microgravedad); si son fijos o móviles; por su grado de autonomía (teleoperados, semi-automáticos, automáticos); por el tamaño (nanobots, microbots, robots); por el tipo de programación, por su sensorización, por la generación, etc.

En este contexto solemos hablar de robots industriales de construcción, normalmente semi-automáticos, fijos, terrestres y de gran escala. Entonces podemos clasificar los sistemas de impresión 3D que se están desarrollando en la actualidad para el sector de la construcción según su arquitectura o geometría: Delta, Cartesiana, Cilíndrica, Esférica, Brazo robot, Cables.

Estas diferentes geometrías afectan a sus respectivos volúmenes de trabajo, por lo que en función de las necesidades de cada caso de aplicación puede ser más adecuado elegir un tipo u otro de arquitectura.

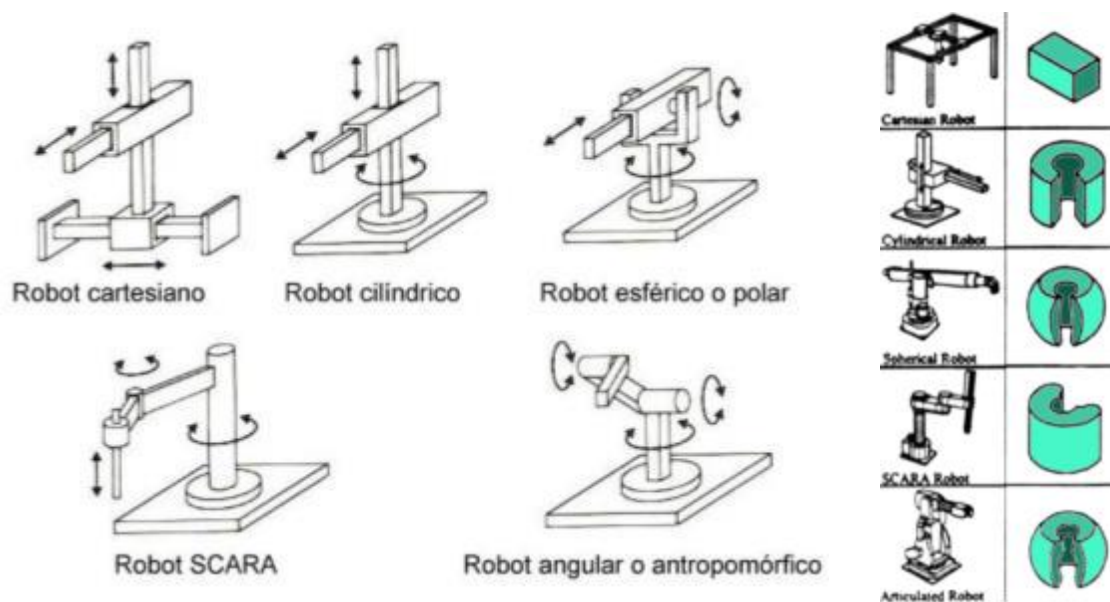


Figura 13. Geometrías utilizadas en sistemas de impresión 3D en la construcción y sus respectivos volúmenes de trabajo.

Delta: utilizan tres brazos que se desplazan sobre guías verticales dispuestas en una configuración triangular. Esta tipología se encuentra actualmente en desuso dentro del contexto de la construcción 3D.



Figura 14. Impresora 3D BigDelta WASP 12MT (modelo ya no en producción) de la empresa WASP (Fuente: WASP, Italia).

Cartesiana: utilizan el sistema de coordenadas cartesiano para el movimiento en tres ejes ortogonales.



Figura 15. Impresoras cartesianas del proyecto 3DCons (España) y de la empresa IDONIAL (España).

Esférica: utilizan el sistema de coordenadas esféricas para su movimiento.



Figura 16. Impresora tipo esférica embarcado en plataforma móvil (y con brazo robótico acoplado) (Fuente: MIT, EEUU).

Cilíndrica: utilizan el sistema de coordenadas cilíndrico para su movimiento.



Figura 17. Impresora CraneWASP (Fuente: WASP, Italia) y Apiscor (Fuente: Apiscor, EEUU).

Brazo robótico: utilizan un brazo articulado con varios grados de libertad (entre 3 y 6 normalmente).



Figura 18. Impresora MX3D que utiliza metal como material de impresión (Fuente MX3D, Holanda).

Cables: utilizan un sistema de cables para desplazar el cabezal de impresión.



Figura 19. Impresora de cables del proyecto europeo de I+D H2020 HINDCON (Fuente: VIAS, España).

D MATERIALES UTILIZADOS EN FABRICACIÓN ADITIVA /IMPRESIÓN 3D ACTUALMENTE Y EN DESARROLLO

Actualmente, son varios los materiales utilizados en fabricación aditiva.

D.1 Polímeros (FDM)

Los materiales plásticos siguen siendo las opciones de materiales más extendidas y empleadas en el marco de la fabricación aditiva (con una presencia en el 65% de las piezas fabricadas mediante FA) y las resinas ya están presentes en un 29% de las aplicaciones impresas por 3D, debido a su diversidad y facilidad de adopción a los diferentes procesos de impresión 3D.

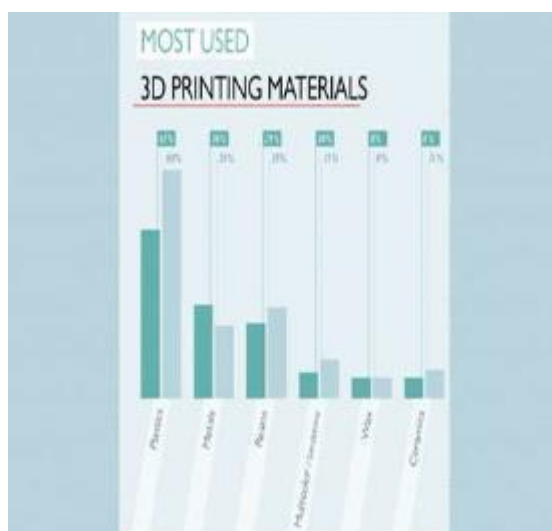


Figura 20. Resultados evolución uso de materiales en Impresión 3D (Fuente: Deloitte).

Uno de ellos es el filamento ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene o Acrilonitrilo Butadieno Estireno) el cual es un polímero termoplástico usados en la denominada impresión 3D tradicional, se vuelven líquidos a una cierta temperatura, lo que permiten ser fácilmente extruible y posteriormente reciclable, sin una degradación significativa. Si bien su uso está implantado en otros sectores como el de la automoción por su resistencia a los impactos, su uso en la construcción se encuentra limitado por su elevado coste en las cantidades que se utilizan en dicho sector.

El mismo caso sucede con el otro protagonista de la impresión 3D llamémosla “tradicional”, este es el PLA (ácido poliláctico) que posee propiedades similares al polietileno, este es utilizado para hacer envases y otros elementos de esas características. Es más ecológico que el ABS al tratarse de un polímero biodegradable si bien su resistencia no es comparable.

Por último, también nos encontramos con otros polímeros como PET (tereftalato de polietileno) que se trata de un plástico utilizado también para hacer envases o los elastómeros termoplásticos (TPE), que están formados por un amplio grupo de copolímeros (y mezclas de polímeros), cuya principal característica es sus propiedades elásticas. Al igual que el PET son plásticos y su uso actualmente se da en la industria del automóvil y los electrodomésticos.

Por consiguiente, al presentar una funcionalidad y un rendimiento mecánico excepcional, se destaca el potencial de los compuestos de matriz polimérica para la fabricación aditiva. Aun así, todos estos materiales polímeros dadas sus características y su coste, si bien pueden ser usados en la industria de la construcción, no están teniendo una gran aceptación debido a sus costes y a sus limitaciones estructurales.

D.2 Morteros y microhormigones

Al igual que los polímeros tienen la característica en común de necesitar aumentar la temperatura para pasar a estado líquido y así poder ser extruido por el sistema de fabricación aditiva, los materiales hidráulicos tienen la característica común de requerir de agua para su activación. A partir dicho momento en el que el agua es añadida disponen de un tiempo de trabajo en el cual deben ser extruidos y una vez allí depositados, fraguar.

Sin lugar a dudas son los materiales más utilizados a día de hoy en la fabricación aditiva en construcción, al igual que sucede con la construcción tradicional. Su coste, disponibilidad y capacidades hacen de ellos los más sencillos de implantar.

Dentro de estos materiales, los materiales en base cemento, bien sean denominados morteros o como microhormigones, bien sean desarrollados “ad hoc” o sean productos comerciales ya existentes en el mercado con otros usos, han sido el punto de partida de la mayoría de los proyectos desarrollados en el ámbito de la construcción tanto para las viviendas de completas, como para partes de ellas, como para elementos prefabricados.

El hormigón, en este caso lo denomina microhormigón dado el tamaño del árido, es un material con sus capacidades más que contrastadas en el ámbito de la construcción con la única limitación de su comportamiento a tracción. Pudiéndose valorar el añadir fibras a la mezcla con el objetivo de mejorar su comportamiento mecánico.

En este sentido, se resalta que el diseño de la mezcla y del equipo son aspectos cruciales con estos materiales ya que se debe satisfacer el requisito de trabajabilidad al mismo tiempo que es imprescindible la adhesión entre capas y una elevada resistencia inicial para soportar las capas posteriores sin colapsar.

A pesar de los desafíos, la libertad de diseño, ausencia de encofrados y la oportunidad de construir estructuras complejas y livianas son ventajas muy prometedoras en este sector.



Figura 21. Elemento impreso en hormigón del Proyecto HINDCON (Fuente: VIAS)

D.3 Yeso

Al igual que en el caso de los materiales base cemento, el yeso se han utilizado en proyectos de fabricación aditiva, principalmente para la impresión de elementos en vertical en interiores. Teniendo la gran ventaja de usando los mismos sistemas de impresión que para los materiales en base cemento, poder imprimir yeso y utilizar sus características.



Figura 22. Impresión vertical en yeso del Proyecto 3DCONS (Fuente: VIAS).

D.4 Arcillas/barro

También hay que destacar dentro de los materiales sostenibles que existen diversos proyectos en marcha que han impreso con barro, incluso en conjunto con paja logrando imprimir adobe. El funcionamiento de una impresora de barro, existentes en la actualidad a diversas escalas, es muy similar al de una de mortero.

D.5 Metales

La fabricación aditiva de metales muestra excelentes perspectivas de crecimiento. La impresión 3D de metales es una tecnología de principios similares a la sinterización láser (SLS): La impresión se realiza a partir de polvo de metal y un dispositivo láser de alta potencia que las une, para finalmente someterlas a un tratamiento térmico. Existen diversas técnicas para lograr este fin.

En general, las piezas metálicas fabricadas con impresión 3D presentan una calidad comparable a las piezas convencionales. Para conseguir un buen resultado, es fundamental el control de la porosidad y la microestructura.

Esta tecnología se ha utilizado principalmente en la industria aeroespacial al permitir la fabricación de piezas a corto plazo. En este contexto, por ejemplo, cabe destacar que actualmente hay más de 50.000 piezas ejecutadas con impresión 3D que están siendo utilizadas en los aviones de Boeing.

Si bien tiene ventajas ya que las piezas poseen características similares a las de las piezas de fundición, estas son más ligeras y económicas en cuanto las piezas son muy complejas. No obstante, dependiendo de qué elementos el precio resulta muy elevado. Haciendo que su aceptación no sea muy amplia en el sector de la construcción.



Figura 23. Puente de acero impreso en 3D de la compañía MX3D (Fuente: MX3D).

D.6 Materiales sostenibles (geopolímeros) y cementos de bajo contenido en clinker

El desarrollo de morteros con conglomerantes geopoliméricos (como alternativa al cemento Portland) y los cementos de bajo contenido en clinker son líneas que actualmente se encuentran en desarrollo y de mucho futuro, principalmente si a la vez se consiguen obtener estos geopolímeros se obtengan de materiales reciclados o de materiales sostenibles cumpliendo con los preceptos de la economía circular, y a la vez reduciendo las emisiones de CO₂ derivadas de la producción de cemento, se lograrán materiales de impresión más respetuosos con el medioambiente.

Asimismo, se pone de manifiesto que las tecnologías de fabricación aditiva permiten la adaptación y combinación de diferentes materiales.

Indicar que algunas propiedades interesantes en el futuro podrán también ser la mejora de propiedades, tanto organolépticas, como con sistemas de encapsulación por ejemplo anti bacteriano o anti víricos que pueden añadirse en las mezclas con tecnologías adecuadas.

Por lo tanto, se espera que se realicen más investigaciones en este ámbito, generando mayores desafíos y oportunidades en el sector de la construcción.



Figura 24. Ánfora fabricada mediante geopolímeros y árido calizo (Fuente: Universidad de Cantabria)



Figura 25. Arrecife artificial fabricado con cemento de bajo contenido en Clinker y vidrio reciclado (Fuente: Universidad de Cantabria)

E NORMATIVA

Ya está disponible la Norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020 Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones (ISO/ASTM 52910:2018). La UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020 es aplicable durante el diseño de esta clase de elementos fabricados por cualquier tipo de sistema aditivo. Este documento ayuda a determinar qué consideraciones de diseño pueden emplearse en un proyecto de diseño o a aprovechar las capacidades de un proceso de fabricación aditiva.

ISO y ASTM International han elaborado conjuntamente la Estructura de desarrollo de estándares de fabricación aditiva que sirve de marco para la creación de nuevos estándares técnicos en el campo de la impresión 3D. Así, UNE, ha adoptado al catálogo nacional esta norma, elaborada en el seno de este grupo conjunto: ISO/TC 261 Additive Manufacturing (<https://committee.iso.org/home/tc261>) y ASTM F42 Additive Manufacturing Technologies (<https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>). Este documento establece los requisitos, pautas y recomendaciones para utilizar la tecnología de fabricación aditiva o Impresión 3D en el diseño de toda clase de productos, dispositivos, sistemas, componentes o piezas.

En septiembre de 2021 había 19 normas ISO relativas a la fabricación aditiva y 36 más en preparación (<https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/>).

El Comité Técnico Español de Normalización CTN 116 (Sistemas Industriales Automatizados), perteneciente a la Asociación Española de Normalización (UNE), es el responsable de la normalización en el ámbito de la fabricación aditiva (Additive Manufacturing). Específicamente trabaja en relación con los procesos, términos y definiciones, sistemas de fabricación (materiales, hardware y software), procedimientos de ensayo, parámetros de calidad, contratos de servicio y cualquier otro tipo de fundamentos. Este comité se ha encargado también de trasponer las normas ISO vigentes relativas a estos temas.

Tabla 3. Normativa UNE vigente relativa a Fabricación Aditiva

Normativa UNE vigente relativa a Fabricación Aditiva
UNE-CEN/TR/ISO/ASTM 52912:2020 (2020-11-01) Fabricación aditiva. Diseño. Fabricación aditiva con gradiente funcional (ISO/ASTM/TR 52912:2020)
UNE-EN ISO/ASTM 52911-1:2020 (2020-10-28) Fabricación aditiva. Diseño. Parte 1: Fusión láser de lecho de polvo de metales. (ISO/ASTM 52911-1:2019).
UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 (2017-11-08) Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología. (ISO/ASTM 52900:2015).
UNE-EN ISO/ASTM 52911-2:2020 (2020-10-28) Fabricación aditiva. Diseño. Parte 2: Fusión láser de lecho de polvo de polímeros. (ISO/ASTM 52911-2:2019).
UNE-EN ISO/ASTM 52921:2017 (2017-05-31) Terminología normalizada para la fabricación aditiva. Sistemas de coordenadas y métodos de ensayo. (ISO/ASTM 52921:2013).
UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020 (2020-04-29) Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones (ISO/ASTM 52910:2018)
UNE-EN ISO/ASTM 52901:2019 (2019-05-08) Fabricación aditiva. Principios generales. Requisitos para la compra de piezas AM. (ISO/ASTM 52901:2017).

UNE 116005:2012 (2012-04-18) Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas.
UNE-EN ISO/ASTM 52950:2021 (2021-04-21) Fabricación aditiva. Principios generales. Visión general del intercambio de datos. (ISO/ASTM 52950:2021).
UNE-EN ISO/ASTM 52907:2020 (2020-10-28) Fabricación aditiva. Materias primas. Métodos para caracterizar polvos metálicos. (ISO/ASTM 52907:2019).
UNE-EN ISO/ASTM 52904:2020 (2020-10-28) Fabricación aditiva. Características y rendimiento del proceso. Práctica para el proceso de fusión de lecho de polvo metálico para cumplir aplicaciones críticas. (ISO/ASTM 52904:2019).
UNE-EN ISO/ASTM 52903-2:2021 (2021-03-31) Fabricación aditiva. Fabricación aditiva de materiales plásticos basada en extrusión de materiales. Parte 2: Equipo de proceso. (ISO/ASTM 52903-2:2020).
UNE-EN ISO/ASTM 52902:2020 (2020-06-17) Fabricación aditiva. Artefactos de ensayo. Evaluación de la capacidad geométrica de los sistemas de fabricación aditiva. (ISO/ASTM 52902:2019).
UNE-EN ISO 17296-3:2017 (2017-05-31) Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Características principales y métodos de ensayo correspondientes. (ISO 17296-3:2014).
UNE-EN ISO 17296-2:2017 (2017-05-31) Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas. (ISO 17296-2:2015).
UNE-EN ISO/ASTM 52903-1:2021 (2021-05-19) Fabricación aditiva. Fabricación aditiva de materiales plásticos basada en extrusión de materiales. Parte 1: Materias primas. (ISO/ASTM 52903-1:2020).
UNE-EN ISO/ASTM 52915:2020 (2020-10-28) Especificación para el formato de archivo para la fabricación aditiva (AMF). Versión 1.2. (ISO/ASTM 52915:2020).
UNE-EN ISO/ASTM 52942:2021 (2021-03-31) Fabricación aditiva. Principios de cualificación. Operadores de máquinas cualificados de máquinas de fusión de lecho de polvo metálico y equipos utilizados en aplicaciones aeroespaciales. (ISO/ASTM 52942:2020).
UNE-EN ISO/ASTM 52941:2021 (2021-04-28) Fabricación aditiva. Rendimiento y confiabilidad del sistema. Método de ensayo normalizado para la aceptación de máquinas de fusión de lecho de polvo para materiales metálicos para aplicaciones aeroespaciales. (ISO/ASTM 52941:2020).

Los códigos de construcción y residenciales actualmente carecen de requisitos prescriptivos para la construcción impresa en 3D. Incluso los requisitos del código para la construcción de hormigón no son directamente aplicables para la construcción impresa en 3D a base de cemento, ya que la fabricación impresa capa sobre capa no está cubierta específicamente por los estándares de hormigón a los que se hace referencia en los códigos actuales.

Dado que no existen requisitos de código prescriptivo para la construcción impresa en 3D, se debe considerar cada proyecto según las disposiciones de materiales y métodos alternativos en el código para su evaluación y aprobación. Este enfoque podría permitir aprobar construcciones de edificios impresos en 3D, siempre que se demuestre que cumplen con la intención de las disposiciones del código y proporcionan la calidad, resistencia estructural, resistencia al fuego, durabilidad y nivel de seguridad prescritos por el código.

En este contexto, es interesante conocer la iniciativa de la empresa de certificación estadounidense UL que en 2017 comenzaron a examinar los factores de seguridad, durabilidad y cumplimiento del código asociados con la construcción de edificios impresos

en 3D. Esta investigación formó la base para una metodología de evaluación de la construcción de edificios impresa en 3D documentada en el esquema UL 3401. Esta metodología determina que el equipo de impresión 3D de un fabricante, el material de fabricación aditiva (AMM) y el proceso de fabricación producirán constantemente elementos de construcción con propiedades que no varían de las muestras probadas inicialmente. Durante el desarrollo de UL 3401, se trabajó con las autoridades de construcción y el programa se debatió en el Consejo de Códigos Internacionales (ICC) para asegurarse de que se abordaran las inquietudes de las autoridades de la construcción.

La metodología UL 3401 cubre la evaluación de estructuras y ensamblajes de edificios tales como paneles, paredes, tabiques, techos, columnas y vigas fabricadas mediante un proceso de fabricación aditiva o de impresión 3D. La evaluación UL 3401 produce el informe de información técnica necesario para determinar si un elemento de construcción impreso en 3D cumple con un código de construcción determinado. Una evaluación UL 3401 determina que los elementos clave de producción producen de manera adecuada y consistente estructuras con propiedades equivalentes a las muestras impresas en 3D que se probaron inicialmente. Estos elementos incluyen: Equipo de impresión 3D; Proceso de fabricación; Materiales de fabricación aditiva (AMM); Procedimientos de control de calidad; Registros de producción. Y la evaluación cubre propiedades como: Propiedades mecánicas; Comportamiento frente al fuego; Barreras de vapor, aire y agua; Aislamiento térmico; Calidad del aire interior; Durabilidad, integridad y rendimiento antes y después de las condiciones de exposición ambiental (exposición a los rayos UV, inmersión en agua y ciclos de congelación-descongelación).

Por último, hay que mencionar que en la edición 2021 del Código Residencial Internacional (IRC) se incluye un apéndice sobre la construcción de edificios impresos en 3D (<https://codes.iccsafe.org/content/IRC2021P1/appendix-aw-3d-printed-building-construction>). Requiere que los edificios y estructuras fabricados en su totalidad o en parte utilizando técnicas de construcción impresas en 3D sean diseñados, contruidos e inspeccionados de acuerdo con UL 3401.

F RETOS, LIMITACIONES Y TENDENCIAS

En este apartado se ha desarrollado, recopilado y resumido los principales retos y limitaciones, así como las tendencias actuales de la impresión 3D, con el fin de obtener las principales líneas de actuación que interesan al conjunto del grupo de trabajo de Fabricación Aditiva (FA) de la PTEC.

En general, la naturaleza nueva y disruptiva de la impresión 3D como tecnología es un factor limitante clave para su implantación. La impresión 3D en la construcción es una innovación, y como la mayoría de las innovaciones, sigue el ciclo de desarrollo tradicional, ilustrado en la figura inferior. A día de hoy, la impresión 3D se encuentra en una etapa entre la demostración y la etapa inicial de nicho de mercado. Esto significa que el mercado aún no está completamente listo y aún necesita ser educado el potencial de la impresión 3D (algunos tienen preocupaciones de seguridad sobre la impresión 3D, algunos están tratando de refinar su propio proceso de impresión 3D, incluido el software o los sistemas robóticos). La educación en torno a la impresión 3D concierne a los clientes, pero también a los usuarios de la tecnología, que necesitan adaptar su comportamiento y los procesos para alcanzar el máximo potencial de esta tecnología. Finalmente, las impresoras 3D exigen importantes esfuerzos de I + D y marketing.

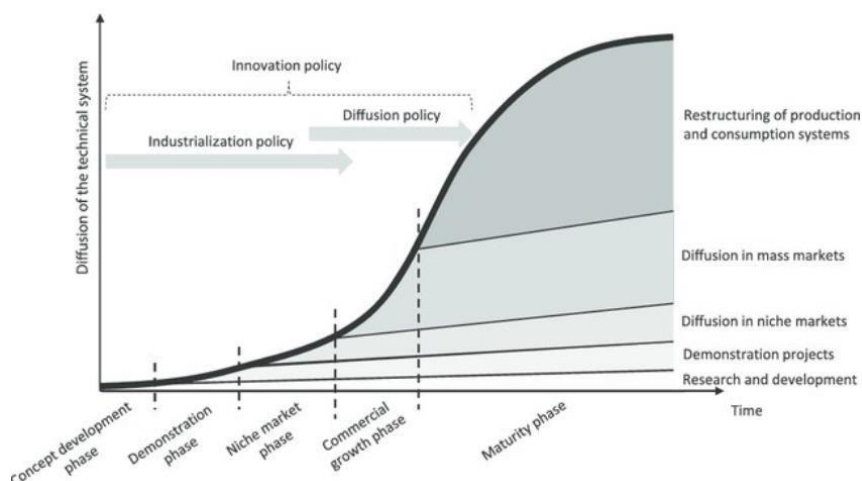


Figura 26. Implantación de las nuevas tecnologías de impresión 3D (Fuente: Gartner, 2015)

En el gráfico anterior puede comprobarse la implantación de las nuevas tecnologías de impresión 3D, y cómo es apenas valorada en ese momento para el sector de la construcción, siendo actualmente una realidad donde se están realizando mayores avances.

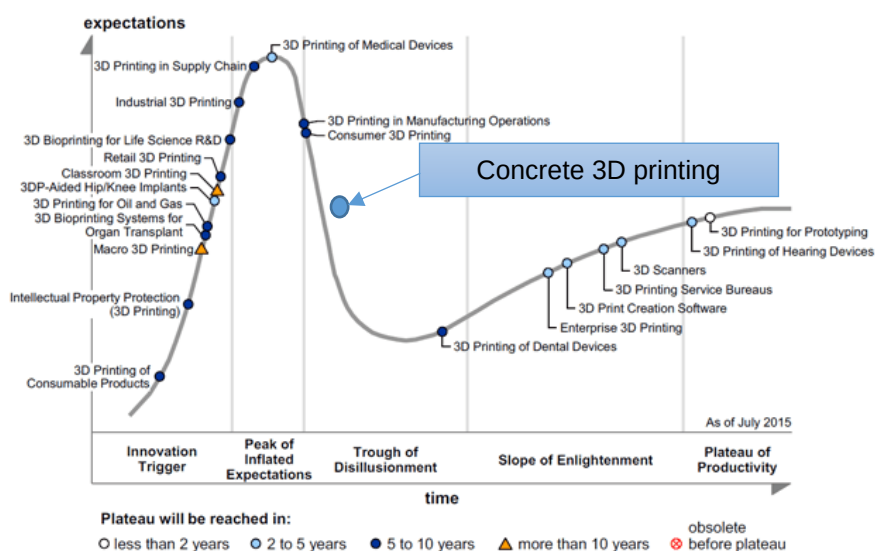


Figura 27. Ciclo de sobreexpectación de la impresión 3D (Fuente: Gartner)

Hay varios factores que favorecen a la implantación de la impresión 3D:

- Factores políticos: Las políticas y en algunos casos las regulaciones e instrumentos fomentan la implementación de Impresión 3D en el sector de la construcción.
- Factores económicos: a medida que se desarrollen las tecnologías, los materiales y los equipos de impresión 3D, sus costes disminuirán y su eficiencia mejorará. Al mismo tiempo, la impresión 3D puede beneficiarse de un aumento conciencia y adopción más amplia en la industria de la construcción. En general, esto puede conducir a economías de escala y una mayor inversión en I + D en impresión 3D.
- Factores de demanda del mercado: tiene un gran ámbito de aplicación, y además goza de grandes ventajas: los arquitectos tienen más opciones de diseño. Ayuda a abordar el problema de la escasez de mano de obra en la construcción observada en numerosos países europeos; acorta el tiempo de ejecución; ofrece la capacidad de utilizar materiales reciclados, reduciendo costos que son cada vez más importantes para los propietarios de proyectos (incluidos los clientes gubernamentales y de la industria).

F.1 RETOS Y LIMITACIONES

Si bien las perspectivas parecen bastante positivas, el mercado de la impresión 3D para la construcción sigue despegando lentamente y enfrenta importantes desafíos.

A pesar del auge que en este momento viven las técnicas de FA y de los sustanciales avances de los últimos años, esta tecnología sigue presentando algunas limitaciones que suponen nuevos retos a los que hay que enfrentarse en la actualidad, para seguir mejorando y evolucionando el proceso [1]–[3].

Como es sabido, en el sector de la construcción se muestra muchas veces reticente a la evolución tecnológica, lo que supone una de las mayores limitaciones. Por este motivo, como reto más general y en paralelo a la mejora de estos sistemas, se debe realizar un esfuerzo por divulgar los avances y ventajas que ofrecen estos sistemas de FA en la construcción.

A continuación, se detalla una serie de **RETOS** específicos, enunciados en base a las **LIMITACIONES** identificadas. Cabe señalar que el listado aportado se ha basado de la revisión bibliográfica fruto de la vigilancia tecnológica que viene desarrollando el equipo de

trabajo. Entre otras fuentes, además de las que se citan, se ha consultado el documento europeo ROADMAP, en el que se definen las principales líneas de investigación sobre la Fabricación Aditiva (FA), junto con las aportaciones de los miembros del GT y la propia investigación y experiencia del equipo coordinador.

F.1.1 Normativa y estandarización

Al tratarse de una técnica nueva y que se encuentra en continuo desarrollo, todavía no se ha redactado una normativa o estandarización para la elaboración de las muestras en los ensayos (imprimir placas, serrar, etc.). Tampoco se dispone de normativas para la realización de los ensayos de flexión, compresión, etc., o de las propiedades físicas, como la porosidad, en los materiales impresos, si exceptuamos la norma estadounidense UL 3401.

Por otra parte, no existe en la actualidad una estandarización de las propiedades en estado fresco que los morteros y hormigones deben cumplir para poder ser imprimibles (propiedades reológicas, tamaño máximo del árido, tiempo de comienzo y fin de fraguado, etc.), en función de las diferentes características que presentan los equipos de impresión, como pueden ser la bomba empleada, del tamaño del extrusor, el uso de tornillos sin fin, etc [3].

F.1.2 Sostenibilidad de los materiales empleados en FA

Uno de los campos en el que queda por avanzar notablemente en la impresión 3D es en la elaboración de mezclas más sostenibles para el medio ambiente, utilizando materiales reciclados ya sea en los conglomerantes, áridos, etc. [3].

Debe potenciarse el conocimiento de la influencia e interacción entre el proceso y el material, para desarrollar procesos y materiales adecuados a las cualidades del producto buscado (mezcla, bombeo, extrusión, pulverización...)

Interesa investigar sobre nuevos materiales reciclados y/o procedentes de desechos de otros procesos industriales, reduciendo su impacto ambiental.

Como una acción posible, sería interesante crear una biblioteca común de materiales imprimibles, con una caracterización específica y normalizada para su uso. Entre las diferentes características deberían estar su composición, proporción, reología, velocidad de impresión, caudal, tiempo de curado, adherencia entre capas, resistencia del material...

F.1.3 Adherencia entre capas del material extruido

Uno de los principales condicionantes que puede encontrarse a la hora de elaborar estructuras impresas mediante extrusión es la adhesión de las numerosas capas que se irán depositando hasta formar los elementos constructivos. Ésta provoca que las estructuras presenten menores resistencias en las direcciones rasantes y ante esfuerzos de tracción [4]–[6]. El reto consiste en encontrar formulaciones y sistemas más avanzados que mejoren esta característica de fabricación, inherente a la tecnología.

F.1.4 Metodologías para la integración de refuerzos en la construcción

Otra de las grandes limitaciones, que se encuentra bastante ligada con la anterior, es la de la resistencia estructural que presenta el hormigón sin la incorporación de algún otro

elemento, como pueden ser las armaduras o las fibras. Hasta el momento, las fibras no han sido un elemento todavía muy probado en la impresión 3D y, además, las que se han probado no han dotado al material de una resistencia a flexión suficiente para sustituir a las armaduras tradicionales [7]–[10].

Por lo tanto, por el momento las armaduras seguirían siendo un elemento estructural imprescindible en la fabricación de cualquier estructura. Estas suponen en la actualidad una limitación, porque aunque el sistema de impresión se encuentra perfectamente automatizado, las armaduras se van introduciendo de forma manual, o se colocan de manera automática posteriormente [11], [12], pero sin estar incorporado este proceso al de la impresión.

Recientemente se han probado también la inclusión de cables flexibles de acero y de carbono en pequeñas muestras de laboratorio [13]–[15] y un prototipo que permite ir introduciendo armadura según avanza la impresión [16]. A pesar de estos progresos, estas técnicas no hay sido todavía aplicadas a grandes estructuras, fuera de los laboratorios.

Así pues, un buen horizonte de investigación y que supondría un gran adelanto en esta tecnología sería el desarrollo de sistemas que permitan incorporar simultáneamente tanto el material como la propia armadura estructural o, en su defecto elementos que realicen la misma función.

F.1.5 Integración de sistemas de FA con los sistemas constructivos actuales.

La introducción de esta nueva tecnología pasa por simplificar lo más posible la integración de los sistemas de FA en los procesos actuales de la construcción, compatibilizándolos y combinándolos de manera óptima.

A partir de esta integración, es posible introducir mejoras importantes en los propios sistemas de FA, como su mantenimiento, durabilidad, eficiencia, seguridad, velocidad, costes, controles de calidad, precisión, tamaño, adaptabilidad, limpieza, etc.

En este sentido, la automatización que aportan ciertos procesos de FA, combinada con los tradicionales o actuales, puede ayudar a abaratar costes y mejorar la productividad.

F.1.6 Integración entre arte, diseño y adaptación a las necesidades del usuario

La fabricación aditiva permite además de la mayor libertad de diseño, lograr la optimización de productos ya existentes, ahorrando en materiales y mejorando sus cualidades gracias al control digital del proceso de diseño y fabricación. No obstante, los acabados que se consiguen actualmente mediante esta técnica son muchos más ásperos, toscos, y en la mayoría de los casos, requieren un posterior tratamiento de las superficies visibles.

En pleno siglo XXI la imagen y la estética juegan un papel fundamental en cualquier sector. Las posibilidades de la FA en el mercado de la construcción suponen un salto cualitativo en la calidad y funcionalidad del diseño.

La posibilidad de participación del usuario en los procesos de concepción y diseño, donde se tengan en cuenta sus gustos y necesidades, redundará en una mayor satisfacción del cliente final.

F.1.7 Integración de sistemas BIM para el modelado de edificios y futura reproducción del modelo virtual con sistemas de FA

Es necesario desarrollar nuevos protocolos de modelado incorporados a los sistemas BIM, que permitan implementar de forma fácil y sencilla los sistemas y soluciones constructivas elegidos por el proyectista en los procesos de producción, conectando directamente la fase de diseño con la de construcción.

Para ello deben integrarse las distintas fases de la construcción en un conjunto de herramientas altamente compatibles y versátiles, capaces de generar la información necesaria para la fabricación, a partir del modelo digital.

F.1.8 Tamaño condicionado por el sistema de impresión

Por otra parte, si se quiere impulsar la tecnología hacia estructuras de mayores dimensiones y alturas, superando la situación actual de ir realizando elementos independientes que luego son ensamblados, debe vencerse otra de las limitaciones que surge de la FA en construcción: las impresoras 3D presentan tamaños similares o superiores a los elementos que imprimen. Por lo tanto, las fabricadas hasta ahora tienen tamaños que todavía se alejan sustancialmente de la escala edificatoria y especialmente de las grandes obras [17], [18].

F.1.9 Impresión multimaterial

Con estos sistemas se pueden obtener ahorros en la cantidad de procesos constructivos sucesivos, unificando y superponiendo tareas que resulten compatibles.

Mediante la integración de diferentes boquillas o sistemas que aporten materiales simultáneamente, se pueden resolver diversos requerimientos constructivos en un mismo proceso, como pueden ser capacidad portante, aislamiento, instalaciones, acabados.

Además, la capacidad de poder fabricar en una misma impresión con distintos materiales permitiría la implementación de nuevos procesos constructivos, como podría ser la generación de soportes de sustentación con material no estructural, que posteriormente pudieran ser retirados, una vez que el material principal haya endurecido o fraguado.

F.1.10 Impresión de elementos no verticales

En la actualidad esta técnica se ha centrado fundamentalmente en el desarrollo de los muros verticales, destinados principalmente a la construcción de viviendas [18]. La elaboración de estructuras con formas más complejas, que puedan incluir cavidades internas, voladizos, etc., precisa todavía de un mayor desarrollo, que permita implementar rellenos a modo de cimbrado provisional o elementos capaces de sustentarse en vuelo tras la impresión. Estos podrían elaborarse con diferentes materiales, como pueden ser arenas, lodos tixotrópicos, materiales degradables, buscando una automatización en la colocación y posterior descimbrado de los mismos.

El desarrollo de nuevos sistemas constructivos que permita la fabricación de elementos no verticales es un reto tanto para la edificación como para la obra civil. En edificación supone la fabricación de forjados, incluso cubiertas inclinadas, pudiendo llegar a sistemas de vigas o losas prefabricadas, mediante el postesado o la incorporación de resinas o fibras. En obra civil implica la fabricación de elementos horizontales o lineales prefabricados para su uso en grandes obras, como pueden ser puentes u otra infraestructura civil.

En resumen, puede decirse que los **principales retos** responden a tres aspectos fundamentales:

1. **Técnicos:** En estado actual de desarrollo de las soluciones, todavía queda mucho desarrollo tecnológico. Podemos distinguir principalmente:
 - a. **Diseño:** Actualmente los diseños siguen los parámetros actuales de construcción y tiene que desarrollarse nuevas herramientas y técnicas para este sistema. Además, hay que resolver los problemas estructurales y la integración con el sistema BIM.
 - b. **Materiales:** Es un campo muy amplio por explorar.
 - c. **Software:** Actualmente no está desarrollado para las necesidades de la impresión 3D en construcción
 - d. **Hardware:** Hay diferentes equipos y técnicas, pero todavía queda muchos aspectos que no están resueltos.
2. **De mercado:** Se está todavía en las primeras fases de comercialización, por tanto, se necesita determinar cuáles son las mejores vías y productos de explotación, fijando las necesidades reales de mercado.
3. **Contextuales:** Aquí intervienen factores externos a la tecnología, como la adopción de estas técnicas por parte de promotores, constructores, arquitectos y a nivel político como solución a los diferentes problemas antes mencionados. Un factor muy importante es la normativa aplicable.

F.2 TENDENCIAS

Las principales **TENDENCIAS** se resumen en dos grandes grupos:

F.2.1 Nuevos sistemas constructivos mediante FA

Es importante entender que para incorporar la fabricación aditiva a la construcción se deben desarrollar nuevos sistemas constructivos, capaces de incorporarla, así como modificaciones o adaptaciones de los existentes, teniendo en cuenta las limitaciones de compatibilidad. Dentro de esta tendencia general, se identifican varias particulares:

F.2.1.1 La construcción multiplanta

Con el fin de optimizar medios, tiempos y costes en la construcción, se busca implementar métodos de fabricación aditiva para la construcción sin limitación de niveles. Para ello se deben desarrollar o rediseñar sistemas constructivos que admitan esta posibilidad.

F.2.1.2 Prefabricación in situ

La prefabricación ha sido tradicionalmente una de las mejores alternativas para acelerar el trabajo en obra, además de mejorar la calidad de las piezas debido a los rigurosos controles de calidad que pueden llevarse a cabo en unas condiciones favorables, muy por encima del trabajo in situ. A través de la FA, la prefabricación en obra tiene sentido para mejorar tanto los tiempos de construcción como la calidad de algunos elementos constructivos.

F.2.1.3 Aplicación a la obra civil

La obra civil implica a veces la construcción de elementos singulares y costosos, mientras que en otras ocasiones se producen elementos muy sencillos y repetitivos, donde la FA puede tener un papel importante, tanto para obtener elementos complejos y únicos como ahorrar costes en grandes volúmenes de piezas idénticas.

F.2.2 Nuevos procesos productivos en la construcción

En este apartado se definen los distintos procesos productivos capaces de dar respuesta a las necesidades de la construcción incorporando las posibilidades de los sistemas de FA.

F.2.2.1 Integración de procesos de diseño con proceso productivo

La FA tiene una gran capacidad para integrar desde la concepción inicial hasta el acabado final, a través de herramientas digitales, capaces de interrelacionarse e interactuar en flujos bidireccionales, durante todo el proceso.

F.2.2.2 Automatización de los procesos de construcción

Obviamente la FA entra en relación directa con la automatización de procesos, aumentando la calidad, precisión y especialmente la seguridad en la construcción en condiciones adversas para el ser humano.

F.2.2.3 Incorporación de trabajos colaborativos (maquina-operario)

Los sistemas constructivos basados en FA pueden mejorar sus resultados con la incorporación de trabajos colaborativos, donde las tareas pueden ser desarrolladas por la máquina, el operario o ambos conjuntamente. Esto optimiza las capacidades, agiliza y mejora la eficiencia y la seguridad de cada tarea.

F.2.2.4 Libertad del diseño y adaptabilidad

La libertad de diseño es una de las principales ventajas de la FA, pues sin aumentar excesivamente los costes puede producir de forma seriada elementos a medida o únicos, lo que permite la fabricación de piezas muy complejas o exclusivas en cantidades elevadas.

G CONCLUSIONES

La impresión 3D con materiales en base cemento es una tecnología que requiere un gran esfuerzo en investigación con el objetivo de demostrar su viabilidad técnica y económica para que sea adoptada por el mercado.

No existe un sistema de impresión universal, ya que cada uno está diseñado para una determinada aplicación y condiciones. Los sistemas de impresión son muy variados y la mayoría se basan en sistemas cartesianos, brazos robóticos y soluciones suspendidas por cables. A pesar de que existe un gran número de iniciativas que han dado lugar al desarrollo de numerosos sistemas de impresión, la falta de consenso dificulta que la impresión 3D se implante en el mercado de forma generalizada ya que el mercado requiere, ante todo, seguridad y tanta dispersión no clarifica la situación y como todos estos temas se encuentran en estudio, no hay una confianza plena de las constructoras en estos sistemas, por lo que fundamentalmente se plantean prototipos.

En particular, se requiere investigar

- En el **desarrollo de materiales específicos y robustos para hacerlos viables industrialmente.**
- Trabajar **en la sistematización tanto de materiales como equipos** disponibles favorecerá el avance de la aplicación de estas tecnologías en la construcción.
- Analizar la legislación existente y trabajar buscando un conjunto completo de estándares para la impresión 3D, con certificación y normalización considerados elementos clave.
- Aumentar el número de casos de éxito comercializados

Por otro lado, a nivel de mercado se necesita:

- Mayor apoyo a las empresas tractoras de esta tecnología.
- La adopción por las empresas líderes y arquitectos.
- Se necesita una mayor investigación en los productos y necesidades del mercado.
- Apoyo a nivel institucional.
- Agilización en las normativas y regulaciones.
- Mayor difusión para dar a conocer las ventajas de la fabricación aditiva a potenciales clientes.

H Bibliografía

- [1] Z. Li *et al.*, “Fresh and hardened properties of extrusion-based 3D-printed cementitious materials: A review,” *Sustain.*, vol. 12, no. 14, pp. 1–33, 2020, doi: 10.3390/su12145628.
- [2] G. W. Ma, L. Wang, and Y. Ju, “State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 61, no. 4, pp. 475–495, 2018, doi: 10.1007/s11431-016-9077-7.
- [3] P. Wu, J. Wang, and X. Wang, “A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry,” *Autom. Constr.*, vol. 68, pp. 21–31, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.
- [4] Y. W. D. Tay, G. H. A. Ting, Y. Qian, B. Panda, L. He, and M. J. Tan, “Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 14, no. 1, pp. 104–113, 2019, doi: 10.1080/17452759.2018.1500420.
- [5] S. H. Bong, B. Nematollahi, A. Nazari, M. Xia, and J. Sanjayan, “Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 6, 2019, doi: 10.3390/ma12060902.
- [6] B. Panda, S. C. Paul, N. A. N. Mohamed, Y. W. D. Tay, and M. J. Tan, “Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 113, no. September 2017, pp. 108–116, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.08.051.
- [7] J. Yu and C. K. Y. Leung, “Impact of 3D printing direction on mechanical performance of strain-hardening cementitious composite (SHCC),” *RILEM Bookseries*, vol. 19, pp. 255–265, 2019, doi: 10.1007/978-3-319-99519-9_24.
- [8] B. Zhu, J. Pan, B. Nematollahi, Z. Zhou, Y. Zhang, and J. Sanjayan, “Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction,” *Mater. Des.*, vol. 181, p. 108088, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108088.
- [9] G. Ma, Z. Li, L. Wang, F. Wang, and J. Sanjayan, “Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 770–783, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008.
- [10] D. G. Soltan and V. C. Li, “A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 90, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017.
- [11] S. Lim *et al.*, “Development of a viable concrete printing process,” *Proc. 28th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. ISARC 2011*, pp. 665–670, 2011, doi: 10.22260/isarc2011/0124.
- [12] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, and V. Mercuri, “3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach,” *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 218–231, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018.
- [13] J. H. Lim, B. Panda, and Q. C. Pham, “Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, pp. 32–41, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.010.
- [14] F. P. Bos, Z. Y. Ahmed, E. R. Jutinov, and T. A. M. Salet, “Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, 2017, doi: 10.3390/ma10111314.
- [15] V. Mechtcherine, A. Michel, M. Liebscher, and T. Schmeier, “Extrusion-based additive manufacturing with carbon reinforced concrete: Concept and feasibility study,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/ma13112568.
- [16] T. Marchment and J. Sanjayan, “Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing,” *Autom. Constr.*, vol. 109, no. August 2019, p. 102992, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102992.

- [17] T. A. M. Salet, Z. Y. Ahmed, F. P. Bos, and H. L. M. Laagland, “3D printed concrete bridge,” *Proc. Int. Conf. Prog. Addit. Manuf.*, vol. 2018-May, pp. 2–9, 2018, doi: 10.25341/D4530C.
- [18] V. Mechtcherine, V. N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto, and M. Krause, “Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing,” *Autom. Constr.*, vol. 107, no. August, p. 102933, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102933.

