

## TECNOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN OFF-SITE Y ON-SITE: DE LA PREFABRICACIÓN A LA ROBÓTICA Y LA IA

*M. Epelde Merino*

Clúster de construcción de Euskadi-BUILD:INN, Bilbao, España

### RESUMEN

La incorporación de nuevas tecnologías al sector de la construcción se ha convertido en un factor clave para mejorar la eficiencia, la precisión y la calidad de los procesos edificatorios. En la actualidad existe una amplia variedad de innovaciones tecnológicas que permiten desarrollar los trabajos de obra nueva y rehabilitación de una forma más ágil y certera. Como aparejadores, resulta fundamental conocer estas herramientas, analizar su potencial y evaluar su posible integración en el día a día profesional, ya que nuestro papel como técnicos nos sitúa en una posición estratégica para impulsar su adopción.

Este trabajo aborda principalmente tecnologías aplicadas a las fases constructivas —prefabricación, optimización de procesos y robótica—, sin dejar de lado aquellas que inciden de forma significativa en las fases de diseño, como los gemelos digitales y la inteligencia artificial. El análisis se centra en tecnologías que aportan valor tanto en entornos off-site como on-site, reconociendo que, pese al avance de la industrialización, siempre existirán tareas que deban ejecutarse necesariamente in situ. El foco se sitúa en aquellas soluciones que mejoran la precisión y la agilidad constructiva durante la ejecución de la obra.

En este contexto, se presentan experiencias que ya constituyen referentes a nivel europeo, especialmente las desarrolladas en el National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication (DFAB) de la ETH de Zúrich. Durante más de doce años, este centro ha investigado la combinación de tecnologías digitales y procesos constructivos físicos, dando lugar a empresas spin-off que han trasladado al mercado componentes, robots y tecnologías innovadoras. Estas soluciones han dejado de ser investigaciones teóricas para convertirse en productos y sistemas constructivos reales.

En el ámbito de la prefabricación y la impresión 3D, los desarrollos del DFAB han transformado el enfoque tradicional, apostando por una prefabricación completamente digital orientada a optimizar el diseño y el cálculo estructural. El objetivo es reducir drásticamente el uso de materias primas mediante elementos resistentes, livianos y altamente optimizados, evitando la generación de residuos desde el origen. Ejemplos destacados son Vaulted, con forjados prefabricados ligeros, o la DFAB House, basada en entramados de madera optimizados y ensamblados robóticamente off-site.

Por otro lado, la robótica aplicada on-site afronta la complejidad inherente a la obra, marcada por condiciones cambiantes y emplazamientos únicos. En este campo sobresalen iniciativas como Gravis Robotics, dedicada a maquinaria autónoma para movimiento de tierras; AUAR, centrada en la fabricación in situ de paneles de entramado ligero de madera; o LAYERED, un robot para trabajos de

enlucido interior. Finalmente, en el ámbito de la digitalización, el departamento Design++ ha desarrollado herramientas avanzadas basadas en nubes de puntos, gemelos digitales e inteligencia artificial, aplicadas al análisis y optimización de configuraciones arquitectónicas, relaciones superficie-volumen y uso eficiente de materiales.

En conclusión, resulta imprescindible normalizar y promover el uso de la tecnología entre los responsables de los procesos constructivos como garante de la mejora edificatoria, entendiendo que su correcta aplicación puede contribuir de forma decisiva a la productividad y actualización del sector de la construcción.

**PALABRAS CLAVE:** nuevas tecnologías, Off-site, On-site, construcción industrializada.

## 1. INTRODUCCIÓN

La adopción de tecnologías emergentes en el sector de la edificación se ha consolidado como un vector estratégico para elevar los niveles de productividad, exactitud y control de calidad en los procesos constructivos. En un contexto marcado por la presión sobre los plazos, el incremento de los costes y la necesidad de cumplir objetivos ambientales cada vez más exigentes, la digitalización y la automatización ofrecen un conjunto de herramientas capaces de transformar tanto la obra nueva como la rehabilitación. Para los profesionales técnicos, y en particular para la figura del aparejador o arquitecto técnico, comprender el alcance de estas innovaciones, evaluar su aplicabilidad y liderar su implementación resulta esencial. Su posición intermedia entre proyecto, dirección facultativa y ejecución les sitúa en un punto privilegiado para impulsar una transición tecnológica coherente y orientada a resultados.

Este trabajo analiza tecnologías vinculadas principalmente a las fases de ejecución —prefabricación avanzada, optimización de procesos, fabricación digital y robótica— sin descuidar aquellas que inciden en la concepción y planificación, como los gemelos digitales o la inteligencia artificial. El foco se dirige hacia soluciones que aportan valor tanto en entornos off-site (fabricación fuera de obra) como on-site (ejecución in situ), asumiendo que, pese al avance de la industrialización, determinadas tareas seguirán requiriendo intervención directa en el emplazamiento. El interés se centra, por tanto, en aquellas herramientas capaces de incrementar la precisión, reducir la variabilidad y agilizar la ejecución durante la fase constructiva.

Sin embargo, cualquier aproximación al concepto de “construcción industrializada” o “prefabricación” exige una reflexión crítica. Estos términos no son nuevos en la historia de la arquitectura y la ingeniería. A comienzos del siglo XX y, con mayor intensidad, tras la Segunda Guerra Mundial, numerosos países europeos promovieron sistemas industrializados para responder a la urgente necesidad de vivienda. Si bien algunos desarrollos alcanzaron cierto éxito inicial, muchos acabaron asociados a patologías graves, problemas de durabilidad, deficiencias de control y, en casos extremos, a derrumbes estructurales. A ello se sumó una estética excesivamente estandarizada, repetitiva y poco contextualizada, que dejó una huella negativa en la percepción social de estos sistemas.

En países como el Reino Unido, la mala reputación derivada de accidentes ocurridos en la década de 1970 llevó incluso a abandonar la terminología tradicional. En lugar de hablar de prefabricación o

construcción industrializada, se adoptó el término Modern Methods of Construction (MMC), o Métodos Modernos de Construcción, con el fin de distanciarse de experiencias pasadas. Este cambio semántico refleja una voluntad de renovación conceptual: no se trata de reproducir modelos fallidos, sino de integrar tecnologías digitales contemporáneas para redefinir la forma de diseñar y construir.

Surge entonces una pregunta inevitable: ¿logrará esta nueva ola tecnológica transformar de manera estructural el sector? La respuesta no puede formularse con certeza absoluta. Sin embargo, el contexto actual presenta dos factores diferenciales respecto a etapas anteriores. Por un lado, existe una acusada escasez de mano de obra cualificada, que tensiona los costes y compromete los plazos. Por otro, se dispone de un ecosistema tecnológico disruptivo basado en la digitalización, la robótica, la fabricación aditiva, el control numérico y la inteligencia artificial. Esta combinación crea una oportunidad inédita para automatizar tareas repetitivas o físicamente exigentes y, simultáneamente, para introducir altos niveles de personalización sin penalizar la eficiencia.

A diferencia de los modelos del pasado, donde la estandarización implicaba uniformidad formal —por ejemplo, paneles de fachada idénticos con huecos en posiciones fijas—, la fabricación digital permite estandarizar el proceso, no el resultado. Las máquinas de control numérico pueden producir componentes distintos con el mismo coste unitario, siempre que compartan una lógica productiva común. De este modo, es posible mantener la eficiencia industrial y, al mismo tiempo, diversificar tamaños de huecos, configuraciones espaciales o soluciones constructivas. La variabilidad deja de ser un obstáculo para convertirse en una variable gestionable mediante datos.

Aunque no constituye el objeto central de este trabajo, conviene recordar un trabajo previo de los autores en donde concluían que cualquier proceso de industrialización o digitalización debe orientarse a mejorar la productividad y la sostenibilidad. Esto implica revisar críticamente aquellas prácticas que aún operan desde la inercia o la “fuerza bruta”: consumos excesivos de materiales, sobreesfuerzos humanos innecesarios o procedimientos poco optimizados. La transición hacia una construcción de alta tecnología exige sustituir estas dinámicas por enfoques basados en inteligencia operativa, análisis de datos y optimización continua. Solo así la cadena de valor completa —desde el diseño hasta el mantenimiento— podrá evolucionar hacia un modelo más eficiente, resiliente y ambientalmente responsable.

Partiendo de estas premisas, el presente trabajo presenta un análisis de tecnologías y soluciones concretas que pueden contribuir de forma tangible a incrementar la productividad y la sostenibilidad del sector, articulando soluciones tanto off-site como on-site y explorando el papel creciente de la inteligencia artificial en la transformación del proceso edificatorio.

## 2. DESARROLLO

En este escenario de transformación tecnológica, destacan experiencias que ya funcionan como referencia en el ámbito europeo. Un caso paradigmático es el desarrollado en el National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication (DFAB) de la ETH de Zúrich, institución académica que durante más de una década ha investigado la integración entre procesos digitales y técnicas constructivas físicas. El trabajo interdisciplinar de este centro ha permitido trasladar avances experimentales al mercado a través de empresas derivadas que comercializan componentes, sistemas robotizados y soluciones constructivas innovadoras. Lo que comenzó como investigación aplicada se

ha materializado en tecnologías tangibles, implementadas en proyectos reales y evaluadas en condiciones de uso.

Ahora bien, cualquier estrategia de modernización del sector debe contemplar de forma complementaria las dimensiones off-site y on-site. La construcción es una actividad compleja, caracterizada por la diversidad de tareas, la singularidad de cada emplazamiento y la variabilidad de las condiciones ambientales. Resultaría simplista asumir que la fabricación fuera de obra —sea bajo el paraguas de la prefabricación, la industrialización o los Métodos Modernos de Construcción— puede absorber la totalidad de los procesos necesarios. Siempre existirán operaciones que, por su naturaleza, deberán ejecutarse in situ.

Por ello, resulta especialmente relevante analizar tecnologías que permitan intervenir directamente en obra, en particular aquellas orientadas a sustituir trabajos peligrosos, repetitivos o físicamente exigentes. Robots capaces de realizar tareas de alto riesgo, sistemas autónomos de movimiento de tierras o equipos que asistan en labores de acabado pueden reducir la siniestralidad y mejorar las condiciones laborales a largo plazo.

Asimismo, la idea de resolver la crisis de vivienda mediante la implantación de grandes fábricas de producción masiva, inspiradas en la industria automovilística, merece una evaluación crítica. Experiencias recientes en algunos países europeos muestran que la viabilidad económica de estas instalaciones depende de mantener una demanda sostenida y estable en el tiempo. Cuando el volumen de pedidos fluctúa o disminuye, las estructuras de costes fijos asociadas a grandes plantas industriales pueden comprometer su continuidad. La principal lección extraída es que la industrialización no puede desligarse del análisis de mercado, la planificación territorial y la flexibilidad productiva.

A la luz de estas consideraciones, el presente trabajo ha recopilado y analizado ejemplos desarrollados en el NCCR Digital Fabrication (DFAB) de la ETH de Zúrich, con el objetivo de identificar tecnologías próximas a su consolidación comercial y que cubran un espectro amplio de actividades, tanto off-site como on-site. La selección responde a la voluntad de integrar soluciones de producción en fábrica y en obra, así como herramientas digitales que optimicen la fase de diseño y planificación.

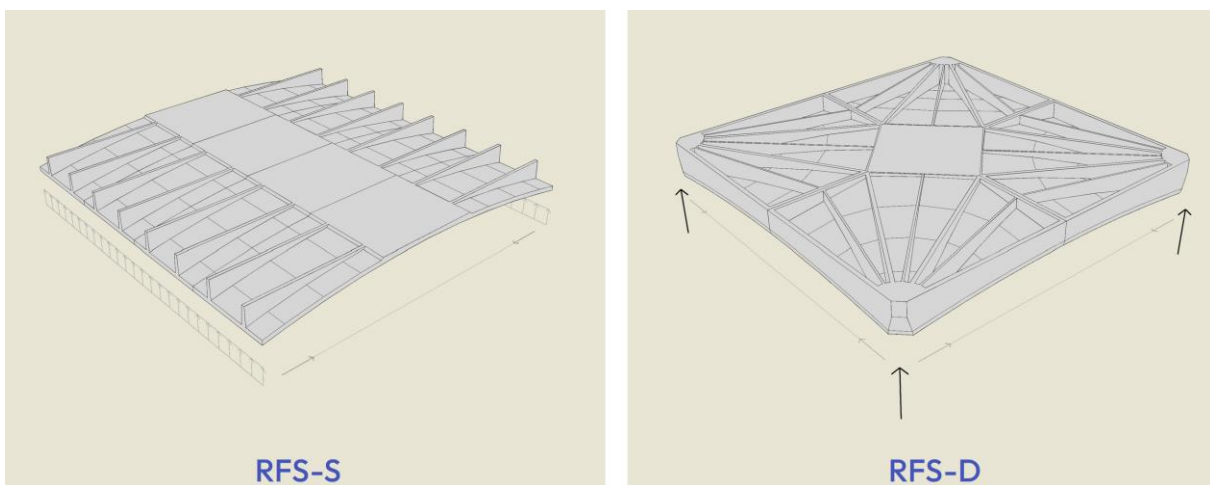
Además, se han examinado avances vinculados a la inteligencia artificial y la digitalización desarrollados en el entorno del departamento Design++, centrados en la explotación de datos, el uso de nubes de puntos y la generación de gemelos digitales. Junto al análisis bibliográfico, el trabajo incorpora información obtenida mediante contacto directo en misiones tecnológicas organizadas por el clúster vasco de la construcción BUILD:INN, cuyo objetivo es conocer de primera mano el estado del arte europeo en tecnología aplicada a la edificación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ámbito de la prefabricación avanzada y la fabricación aditiva, los desarrollos impulsados desde el entorno DFAB han redefinido el enfoque convencional. Frente a la prefabricación tradicional basada en la repetición de elementos estándar, se propone una prefabricación completamente digital, en la que el diseño estructural y el cálculo se integran desde el inicio con los procesos de fabricación. El propósito principal es minimizar el consumo de materias primas mediante la creación de elementos

resistentes, ligeros y geoméricamente optimizados, evitando la generación de residuos desde la fase de concepción.

Un ejemplo significativo es Vaulted, iniciativa vinculada al sistema Rippmann Floor System (RFS) [Figura 1], que recupera principios estructurales históricos —como el trabajo a compresión característico de las bóvedas— y los reinterpreta mediante herramientas de ingeniería computacional. Este sistema permite reducir aproximadamente un tercio del hormigón empleado y hasta una décima parte del acero, al situar cada material en la zona estructural donde resulta más eficiente. El hormigón se dispone fundamentalmente a compresión, mientras que el diseño geométrico optimizado absorbe esfuerzos de manera más eficaz. Además, los elementos se discretizan en piezas ensamblables sin adhesivos ni conectores mecánicos complejos, lo que facilita su desmontaje y reutilización futura, alineándose con principios de economía circular.



**Figura 1.** Imágenes Rippmann Floor System: **(a)** RFS-Single Span. **(b)** RFS-Double Span. **Fuente:** Vaulted.

Otro referente es la DFAB House [Figura 2], concebida no solo como un edificio experimental, sino como un prototipo habitado que integra procesos digitales de principio a fin. Su singularidad radica en que tanto el diseño como la planificación y la ejecución —en fábrica y en obra— se realizaron mediante flujos digitales coordinados. El proyecto implicó la colaboración de diversas cátedras de la ETH de Zúrich y permitió trasladar seis procesos constructivos innovadores desde el laboratorio hasta una aplicación arquitectónica real. Entre estos procesos se encuentran robots autónomos para construcción in situ, sistemas de encofrado robotizado sin moldes tradicionales para estructuras de hormigón armado, técnicas automatizadas de hormigonado continuo, losas optimizadas con encofrados impresos en 3D y estructuras espaciales de madera ensambladas robóticamente. La combinación de estas tecnologías en un único edificio posibilitó replantear el proceso constructivo

global, explotando las ventajas de la cadena digital completa: flexibilidad de diseño, ahorro de materiales, eficiencia temporal y económica, así como mayor control de calidad.



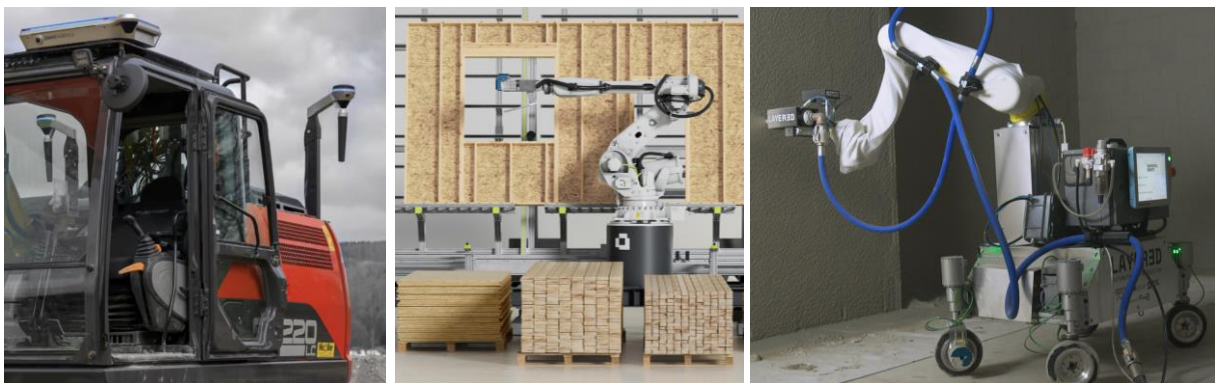
**Figura 2.** Imagen DFAB House. **Fuente:** Dfabhouse.ch.

En el ámbito de la ejecución in situ, la robótica debe desenvolverse en escenarios variables, con geometrías no repetitivas, interferencias imprevistas y condiciones ambientales cambiantes. A diferencia de los entornos industriales controlados, la obra constituye un espacio dinámico donde la estandarización es limitada. En este contexto emergen iniciativas que abordan tareas clave como el movimiento de tierras, la fabricación localizada de componentes estructurales de madera o los acabados interiores, especialmente aquellos que implican elevada exigencia física. Estas soluciones no solo persiguen incrementar la productividad, sino también reducir la exposición al riesgo y mejorar la calidad final de los trabajos.

Gravis Robotics, es una empresa suiza surgida del ecosistema tecnológico de la ETH de Zúrich que convierte maquinaria convencional de movimiento de tierras en sistemas autónomos impulsados por inteligencia artificial. Su propuesta se basa en la adaptación de equipos existentes —como excavadoras [Figura 3a]— mediante soluciones de retrofit que integran sensores avanzados, sistemas LiDAR, posicionamiento GPS y control digital de circuitos hidráulicos. A través de estos módulos, la maquinaria puede ejecutar tareas de forma autónoma o semiautónoma, siguiendo modelos digitales procedentes de planos CAD y ajustándose en tiempo real a las condiciones del terreno. El sistema incorpora una interfaz táctil intuitiva que permite supervisión o teleoperación, ampliando las capacidades del equipo humano y elevando los estándares de seguridad en obra. Entre sus aplicaciones se incluyen la preparación de parcelas, la gestión de acopios, la carga de camiones, la excavación de zanjas y la nivelación. Este enfoque permite incrementar la productividad —con mejoras estimadas en torno al 30 %— sin requerir una sustitución completa del parque de maquinaria existente, lo que facilita su adopción progresiva.

Por su parte, AUAR —acrónimo de Automated Architecture— desarrolla un modelo descentralizado de fabricación de estructuras ligeras de madera mediante robótica industrial. Con sede en el Reino Unido, la empresa colabora con fabricantes de robots para implantar microfábricas automatizadas [Figura 3b] capaces de producir paneles estructurales en proximidad al emplazamiento de la obra. Frente a la lógica de grandes plantas centralizadas, su estrategia se articula en torno a un modelo Hardware-as-a-Service (HaaS), mediante el cual las microfábricas se licencian a constructores locales. Este planteamiento reduce costes logísticos, disminuye la huella de carbono asociada al transporte y adapta la capacidad productiva a la demanda real del territorio. La integración entre diseño digital y fabricación robotizada se gestiona mediante software propio, que permite personalizar cada vivienda sin penalizar la eficiencia del proceso. Según los datos disponibles, la automatización puede disminuir la necesidad de mano de obra directa hasta en un 75 % y reducir los costes de producción en torno a un 40 % respecto a métodos tradicionales, posibilitando el ensamblaje estructural de una vivienda en menos de doce horas. La clave radica en estandarizar el proceso productivo manteniendo la flexibilidad formal del resultado final.

En el ámbito de los acabados interiores, LAYERED representa una aproximación específica a la automatización del enlucido y revestimiento de paramentos. Esta startup suiza, originada en investigaciones desarrolladas en la ETH de Zúrich y vinculada al grupo Gramazio Kohler Research, centra su actividad en la robotización del enlucido manual, que exige un esfuerzo físico considerable, presenta riesgos ergonómicos y depende de mano de obra cualificada cada vez más escasa en Europa. La solución propuesta consiste en robots móviles autónomos [Figura 3c] capaces de aplicar capas finas de material mediante técnicas de impresión controlada. Estos sistemas escanean el entorno, reconocen la geometría de los paramentos y planifican la trayectoria de aplicación de forma automatizada, adaptándose a variaciones formales. Entre las ventajas declaradas se encuentran una velocidad de ejecución hasta dos veces superior a la manual, una reducción del desperdicio de material en torno al 20 % y una mejora en la uniformidad del acabado. Más allá del incremento de productividad, la automatización contribuye a mejorar las condiciones laborales y a dignificar un proceso tradicionalmente asociado a alta penosidad.



**Figura 3.** Imágenes robots on site: **(a)** Gravis Robotics. **(b)** AUAR. **(c)** Layered. **Fuente:** Varias.

En paralelo a estas aplicaciones directamente vinculadas a la ejecución física, la digitalización avanzada desempeña un papel estratégico en la optimización integral del proceso edificatorio. En este sentido,

Design++ constituye una iniciativa de investigación y formación que integra inteligencia artificial, computación avanzada y tecnologías digitales en el ámbito de la arquitectura, la ingeniería y la construcción. Entre sus líneas de trabajo se incluyen el análisis de nubes de puntos para la creación de gemelos digitales de alta precisión, la aplicación de algoritmos de diseño generativo para reducir el consumo de materiales estructurales y la utilización de aprendizaje automático para anticipar el comportamiento energético de edificios desde fases conceptuales. Asimismo, se desarrollan técnicas de fabricación y ensamblaje automatizado que conectan directamente la fase digital con la producción física, reduciendo errores y mejorando el control de calidad.

Como se puede observar, las iniciativas descritas evidencian un origen marcadamente multidisciplinar y colaborativo, en el que convergen ingeniería mecánica, informática, arquitectura, ciencia de datos y gestión industrial. Todas ellas comparten un objetivo común: resolver problemas concretos del sector mediante la integración coherente entre concepción digital y ejecución material, avanzando hacia un modelo constructivo más eficiente, seguro y sostenible.

#### 4. CONCLUSIONES

La evolución desde la prefabricación tradicional hacia un ecosistema integrado de fabricación digital, robótica e inteligencia artificial no representa una simple actualización tecnológica, sino un cambio de paradigma en la forma de concebir y ejecutar la arquitectura y la ingeniería. Las experiencias analizadas demuestran que es posible combinar precisión geométrica, optimización estructural y reducción de recursos sin renunciar a la calidad espacial ni a la diversidad formal.

El principal aprendizaje radica en comprender que la industrialización contemporánea no debe confundirse con la repetición acrítica de modelos del pasado. La estandarización ya no implica uniformidad estética, sino racionalización de procesos. La variabilidad puede gestionarse digitalmente, permitiendo personalización masiva con eficiencia industrial.

Asimismo, la dicotomía entre off-site y on-site debe abordarse desde una perspectiva complementaria. La fabricación en fábrica puede mejorar el control y la calidad de determinados componentes, mientras que la robótica en obra puede incrementar la seguridad y reducir la penosidad de tareas específicas. El equilibrio entre ambos enfoques dependerá del contexto económico, la escala del proyecto y la estabilidad de la demanda.

La inteligencia artificial, por su parte, emerge como catalizador transversal. Su capacidad para analizar datos, optimizar diseños y asistir en la toma de decisiones amplía el horizonte de la construcción hacia un modelo más predictivo y menos reactivo.

Por tanto, el futuro de la construcción no se dirime únicamente en la adopción de nuevas máquinas o algoritmos: la escasez de mano de obra y la presión ambiental actúan como motores de cambio y la tecnología ofrece herramientas potentes. El desafío consiste en integrarlas estratégicamente para convertir la construcción en una industria verdaderamente avanzada, eficiente y responsable a lo largo de toda su cadena de valor.

## 5. ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

MMC	Modern Methods of Construction
NCCR	National Centre of Competence in Research
DFAB	Digital Fabrication

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo quiere agradecer al profesor Dr. Russell Loveridge, General Manager del NCCR Digital Fabrication por el conocimiento compartido con el Clúster de Construcción del País Vasco, BUILD:INN.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] F. Gramazio y M. Kolher, “The Robotic Touch. How Robots Change Architecture”, Gramazio & Kohler Research ETH Zurich 2005–2013 Park Books, 2014.