

# Viabilidad de la Impresión 3D de concreto para la constructibilidad de viviendas sociales

## Viability of 3D printing of concrete for the constructability of social housing

Eva Kiara Chávez Camarena, Bachiller de Ingeniería Civil<sup>1</sup>, Norma Luz Rengifo Cuellar, Bachiller de Ingeniería Civil<sup>2</sup> y Jorge Ronald De La Torre Salazar, Magister de Ingeniería Civil<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, [u201714201@upc.edu.pe](mailto:u201714201@upc.edu.pe)

<sup>2</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, [u201715018@upc.edu.pe](mailto:u201715018@upc.edu.pe)

<sup>3</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, [pccijdel@upc.edu.pe](mailto:pccijdel@upc.edu.pe)

**Resumen**—El presente documento muestra como los avances en la tecnología permiten encontrar una solución al actual déficit de vivienda social, presente principalmente en muchos países latinoamericanos como en el caso de Perú, a través de la impresión 3D de concreto. Actualmente múltiples avances muestran los beneficios de esta tecnología de fabricación aditiva con respecto a la minimización de tiempo y costo en la entrega de viviendas. Por lo cual, se espera realizar una investigación más a fondo para el caso de las viviendas sociales tan altamente demandadas en un país como Perú que cuenta con una alta densidad poblacional a causa de la centralización. Es así que se evalúa la viabilidad de la aplicación de la impresión 3D evaluando la sostenibilidad, el tiempo, el costo, la productividad y los riesgos para la entrega de este tipo de viviendas unifamiliares, donde el principal resultado es que su aplicación resulta idónea de acuerdo a la evaluación económica-tiempo, la comparación de la productividad y riesgos con el método tradicional, y sus beneficios de reducir los residuos y el empleo de material reciclable en la mezcla aditiva.

**Palabras claves**— Impresión 3D de concreto, viviendas sociales, viabilidad, constructibilidad, costo, tiempo

**Abstract**— This document shows how advances in technology make it possible to find a solution to the current social housing deficit, present mainly in many Latin American countries such as Peru, through 3D printing of concrete. Currently, multiple advances show the benefits of this additive manufacturing technology with respect to the minimization of time and cost in the delivery of homes. Therefore, it is expected to carry out a more in-depth investigation for the case of social housing so highly demanded in a country like Peru that has a high population density due to centralization. Thus, the feasibility of the application of 3D printing is evaluated, evaluating the sustainability, time, cost, productivity and risks for the delivery of this type of single-family homes, where the main result is that its application is suitable for according to the economic-time evaluation, the comparison of productivity and risks with the traditional method, and its benefits of reducing waste and the use of recyclable material in the additive mixture.

**Keywords**— 3D printing of concrete, social housing, viability, constructability, cost, time.

### I. INTRODUCCIÓN

En la última década, el déficit habitacional a nivel latinoamericano ha alcanzado a componer el 54% del inventario de viviendas, siendo el Perú uno de los 3 países en América Latina con mayor déficit habitacional, alcanzando una brecha del 75% [1]. Ello equivale a todo un completo desafío para el gobierno y los programas como Techo Propio y Fondo Mi Vivienda que subsidian unidades habitacionales a quienes poseen una necesidad de ayuda económica más alta. Sin embargo, se debe considerar a las empresas constructoras como parte esencial en la búsqueda de la solución a este déficit ya que, según el informe económico de la construcción realizado por la Cámara Peruana de La Construcción, lograr una articulación por parte de estas empresas con los programas de subsidio habitacional es un reto que alcanzar para garantizar una construcción más segura [2].

La vivienda social subsidiada por el estado equivale a que esta debe ser optimizada en tiempo y costo, para así obtener una mayor rentabilidad en el caso de las empresas constructoras y, al mismo tiempo, para que no se presenten retrasos que aplacen aún más la espera de dichas viviendas tan demandadas. Por ello, como propuesta de mejora al actual método de construcción se desarrolla la impresión 3D de concreto como parte del concepto de construcción 4.0 enfocada en la digitalización de los procesos [3].

Múltiples estudios califican a la impresión 3D de concreto como aquella que posee la ventaja de una mayor eficiencia de construcción, minimizando los desperdicios en la construcción y reduciendo hasta el 35% del costo de mano de obra [4, 5], sin mencionar el ahorro por parte de la reducción del uso de encofrado y el proceso de vibración [4].

Pese a ser una tecnología considerablemente nueva en comparación con los actuales métodos de construcción, se encuentra captando reconocimiento por el gran potencial en aplicaciones prácticas que presenta, como la construcción de viviendas asequibles en países de bajo ingreso [4]. Así como evitar los errores de construcción y sobrecostos mediante la automatización.

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.58>  
ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Adicionando a su capacidad para la reducción de costo y tiempo, se suma los numerosos estudios enfocados a la sostenibilidad y productividad, pues se cataloga a esta tecnología como una solución prometedora para las demandas por parte del mercado masivo. Esto es debido al potencial de extruir elementos geométricos con gran libertad, obteniendo un menor consumo de material, así como la ventaja de selección del material más sostenible y ecológico para la mezcla [5]. Otras fuentes recalcan su ventaja en la reducción de desperdicio al poseer una alta tasa de emplear material reciclable y un proceso más directo para abordar la alta demanda de prácticas constructivas más sostenibles y eficientes con respecto al empleo de recursos, ya que permite formas de mejorar la huella de carbono en las edificaciones al reducir su energía incorporada y operativa [6]

En línea con ello, se menciona que algunas soluciones a estos desafíos pueden involucrar el empleo de pre fabricados; sin embargo, algunos resultados de estudios realizados entre la impresión 3D de concreto en comparación con los pre fabricados tradicionales resultan mayor favorables al a impresión 3D en tanto a costo económico, impactos ambientales y mejora de la productividad [7]. El estudio arroja una reducción del 85.9% de la emisión de CO<sub>2</sub> y una disminución del 87.1% del consumo de energía lo que se asocia principalmente a la producción del encofrado metálico que es empleado en los elementos pre fabricados de concreto.

La relación entre el empleo de la impresión 3D de concreto como tecnología en la construcción de las viviendas va fuertemente de la mano con una mejora en la productividad, ya mencionada. Estudios avalan con estadística lo mencionado, "...el proyecto de investigación sugiere un aumento anual del 1,33% en la productividad, que es casi seis veces al aumento actual..." [8]. Este aumento en la productividad nos demuestra la potencia de apostar por el uso de las tecnologías de digitalización en la construcción, sobretodo la construcción masiva, como son las viviendas de interés social.

Asimismo, "...los resultados obtenidos [...] son capaces de proporcionar algunas ideas, inspiraciones y orientación a los investigadores, empresas, tomadores de decisiones y organismos correspondientes para un mayor desarrollo de la impresión 3D de concreto [...] manteniendo una alta eficacia y sostenibilidad medioambiental a través del uso de esta tecnología sostenible y verde ..." [7]

La capacidad que se debe alcanzar para poder cumplir cada uno de los desafíos presentes en la construcción son muy altas. A ello se le suma la relevancia y la necesidad de quienes no cuentan con una estabilidad económica que les permita acceder a una vivienda de calidad a causa de la alta demanda de las viviendas sociales y el paso con el cual se busca reducir la brecha habitacional.

Por tal motivo, este artículo de investigación presenta una revisión de la literatura de la impresión 3D con el objetivo de poder obtener resultados positivos sobre el beneficio de emplear la Impresión 3D de concreto para la construcción de viviendas masivas de interés social, con respecto a la disminución del impacto ambiental de la construcción como tal, manteniendo márgenes de utilidad y tiempo apropiados para las mismas. El contenido del paper está basado en recientes validaciones, estudios y resultados obtenidos por investigadores alrededor del mundo, y, especialmente en Latinoamérica. Adicionalmente, se presenta un prototipo de

vivienda para la evaluación de la misma, en base a sus características y condiciones correspondientes, con este se plantea un cronograma y flujo económico que es indispensable para la puesta en marcha del proyecto.

## II. CONTENIDO

### A. *Método*

El presente estudio es de nivel explicativo ya que busca dar a conocer cómo se encuentra la situación de las viviendas masivas de interés social antes y como se proyectan después de implementar la tecnología de impresión 3D de concreto. Asimismo, es de carácter teórico puesto que no se ha materializado el prototipo que se plantea ni adquirido una impresora 3D para la experimentación.

Se realizó la validación de la solución planteada bajo el método de juicio de expertos y para ello se emplearon 2 preguntas de validación, en escala de Likert para poder medir la opinión de los 17 especialistas consultados de 7 países, el número de expertos fue seleccionado ya que en un grupo homogéneo el número considerable es entre 10 y 15 expertos [9]. Este método de validación con escala de Likert se encuentra establecido mediante una escala del 1 al 5, en donde, el 4 y el 5 se encuentran en el nivel de aceptación más óptimo de predisposición y aprobación de la pregunta en cuestión.

### B. *Herramientas*

Dada la condición bajo la cual se desarrolla la investigación, tal y como se mencionó anteriormente, se espera poder analizar la aplicación de la impresión 3D a través de un prototipo de vivienda que, si bien no será materializado para el presente paper, será evaluado acorde al carácter teórico que este posee. Aquello será realizado a manera de obtener un mayor acercamiento a esta tecnología y evaluar si esta se presenta viable para la construcción de viviendas masivas y sociales.

Para poder obtener los resultados esperados, se requirió el empleo de varias herramientas, como los que se mencionan a continuación: AutoCAD, Autodesk Revit, Microsoft Project, Microsoft Excel, Microsoft Power BI, Google Forms.

El uso de estas herramientas, como en el caso de los softwares desarrollados por Autodesk, fueron útiles para poder materializar digitalmente el concepto de vivienda social que se plantea en esta investigación, ya que usualmente estos softwares tienen la ventaja de cubrir la información geométrica, las relaciones espaciales y la información de fabricación [10]. Asimismo, se considera una buena opción el empleo de softwares BIM dado que múltiples estudios mencionan la eficacia que BIM ha demostrado para la implementación de la impresión 3D, tanto a pequeña como a gran escala [11].

### C. *Metodología*

Con lo correspondiente a la metodología para el desarrollo del presente paper se han considerado siete fases que se detallan a continuación:

En la primera fase se realizó una revisión de la literatura correspondiente a las viviendas sociales, los programas sociales y todos los requisitos que lo competen, en este caso, referente a Lima, Perú. De esto se recopiló información de los parámetros técnicos y económicos de lo que correspondiente

a estas viviendas para poder llevar a cabo las siguientes fases en adelante.

Seguidamente, en la segunda fase, y luego de la revisión mencionada anteriormente, se plasmó un prototipo de vivienda social de un nivel para luego evaluar los parámetros de este. Este prototipo se realizó en el programa AutoCAD y Revit, para poder modelarlo y obtener sus características en cuanto al área y metrado del mismo. El diseño de la distribución de los ambientes ha sido plasmado de acuerdo a lo revisado en la primera fase, en base a las viviendas que ya se encuentran validadas como proyecto a construirse bajo la modalidad de vivienda de interés social.

En la tercera fase se realizó, en primer lugar, la evaluación del tiempo para poder con esto, proceder a evaluar también económicamente lo el prototipo propuesto. Para esto se plasma teóricamente un comparativo de un cronograma entre la propuesta con impresión 3D de concreto y la propuesta realizada bajo el método tradicional. Esto se realiza para poder analizar la ventaja económica que presenta, pese a su alta inversión inicial, la implementación de la impresión 3D de concreto. Para lo último mencionado se realizó un análisis minucioso de la rentabilidad del proyecto.

En la cuarta fase se enfocó el análisis a lo correspondiente a la sostenibilidad del planteamiento del uso de la impresión 3D de concreto, para poder observar sus beneficios con este parámetro muy importante para los futuros proyectos de construcción en la coyuntura actual, en donde los proyectos más prósperos son los que contribuyen a minimizar la contaminación ambiental y demás.

En la quinta fase, se ahonda en la productividad realizando una búsqueda de la literatura, donde se procesan las diversas opiniones de investigadores sobre la productividad de las nuevas tecnologías, como lo es la impresión 3D de concreto, y sus posibles beneficios en comparación con el método tradicional.

La sexta fase se centra en la reducción de los riesgos, como accidentes o riesgos técnicos que alteren el producto, por lo cual se realiza un cuadro comparativo de todos los aspectos que se encuentren en la revisión de la literatura sobre la fabricación aditiva vs el método tradicional.

Finalmente, en la séptima fase se realizó un flujograma del procedimiento constructivo que se debe tomar en cuenta para poder implementar la impresión 3D de concreto en los proyectos. Con esto último ya se obtuvieron todos los resultados para posteriormente realizar el análisis de todos los resultados obtenidos.

### III. RESULTADOS

Luego de una revisión de la literatura, revisión de los actuales programas que subsidian las viviendas sociales y recopilación de datos de las empresas que actualmente lideran el mercado de la impresión 3D de concreto, se materializó la información en un prototipo de vivienda social para el cual se identificaron los procesos, los tiempos de construcción, los costos, la sostenibilidad y la constructibilidad que esta requiere.

#### A. Prototipo

Respecto a la revisión de la literatura, se pudo conocer que la impresión 3D de concreto es una tecnología relativamente nueva que permite la construcción de las viviendas mediante un sistema que permite extruir capa a capa el concreto hasta

formar los muros impresos. La modalidad in situ presenta tanto ventajas como desventajas, donde la principal ventaja radica en la velocidad de la construcción de los elementos verticales y la capacidad de reducir residuos. Por otro lado, la principal desventaja resulta ser la falta de normatividad y su capacidad de resistencia para una construcción vertical amplia, un aspecto importante en ciudades con alto índice poblacional.

Los resultados del mapeo de viviendas muestran que la mayoría de los proyectos subsidiados por programas sociales son construidos a base de un único piso, dejando la proyección de un segundo para las familias que adquieran dichas viviendas. En el caso de la revisión de las actuales viviendas desarrolladas bajo la impresión 3D es posible encontrar algunas como la desarrollado por ICON en el 2019 en colaboración con New Story y Échale, en el cual se presenta una opción de una vivienda de un nivel para las familias locales y que viven bajo extrema pobreza en la comunidad de Tabasco, México [12]. Por tal motivo, se plantea un diseño enfocado en una vivienda de 1 piso, extraído del Banco de Proyectos en progreso del programa Techo Propio, con un área construida de 35 m<sup>2</sup>.

Respecto a la evaluación de proveedores de impresoras 3D en el mercado, se obtuvo una mayor ventaja en la selección de las impresoras tipo pórtico (como: COBOD, PERI, Be More 3D). Ello fue debido a que no se necesita calibrar sus coordenadas cada vez que se trasladen a otro punto de impresión y porque se considera el uso de la impresora para la construcción masiva de viviendas, donde es posible encontrar en el mercado impresoras 3D de concreto de pórtico tipo riel y con una facilidad para su montaje.

Durante el modelado, surgieron múltiples conjeturas respecto a la construcción de cada uno de los elementos de las viviendas. De ello se realizó una investigación obteniendo que, hasta la fecha, los elementos que son posibles construir a través de la impresión 3D son los elementos verticales, pudiendo optar por un entrepiso prefabricado, en el caso se opte por la construcción de más de un piso, o por el uso de un material más ligero para la cubierta/techo. En el caso de la cimentación es posible optar por una losa armada construida bajo el método tradicional o imprimir los contornos si se usase una cimentación tipo zapata.

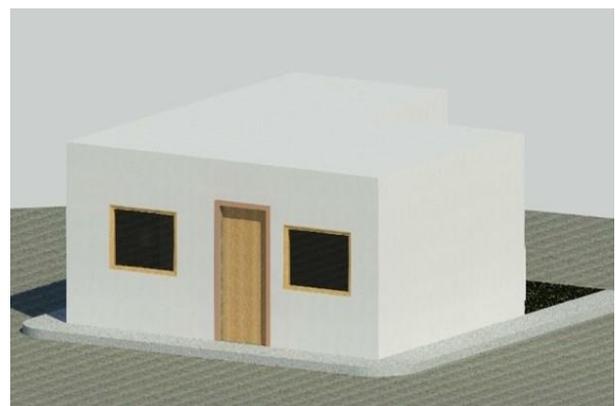


Fig. 1. Prototipo 3D de un módulo de vivienda social basado en proyectos del programa Techo Propio

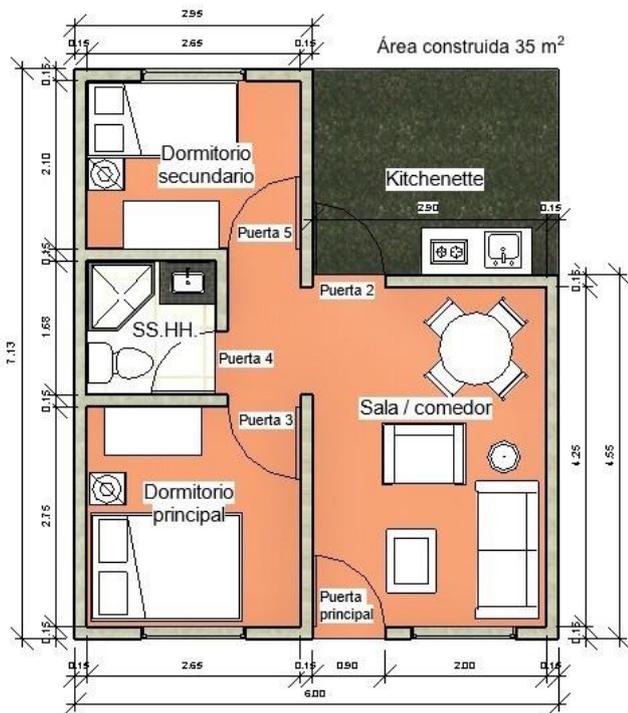


Fig. 2. Vista de planta de prototipo 3D de vivienda social basado en proyectos del programa Techo Propio

### B. Evaluación de tiempo

Como parte de la evaluación del tiempo de construcción, se elaboraron 2 cronogramas donde se toman en cuenta las partidas principales de obras provisionales y movimiento de tierras para ambos casos, ya que la nivelación del terreno es un aspecto que deben cumplir ambas metodologías para la recepción de las cimentaciones. Posteriormente se consideró una cimentación realizada bajo el método tradicional, aunque es posible emplear la impresora 3D para la impresión de contornos.

En la etapa de estructuras es donde se puede observar la principal diferencia principalmente debido al uso de la impresora 3D, la cual permite una reducción de días gracias a su velocidad de extrusión de la mezcla, ya que es continua en todo momento, y dado que se reducen las interrupciones y los errores debido al proceso automatizado de construcción. Igualmente se recalca la ventaja de reducir el uso del encofrado ya que al igual cómo es posible imprimir los contornos de las cimentaciones, es posible imprimir los contornos de las columnas formando parte del muro impreso, requiriendo únicamente la colocación de la armadura y el vaciado propio del concreto.

En el caso de las partidas de los elementos horizontales y verticales se considera un tiempo de construcción significativamente similar debido a que la mayor parte de estos es construida a base del método tradicional o empleando algún material prefabricado.

La elaboración de ambos cronogramas se realizó a través del programa Microsoft Excel y Microsoft Project, estableciendo la ruta crítica para ambos métodos, la construcción de una vivienda social construida con la impresión 3D de concreto y otra con el método tradicional, para poder comparar las partidas más importantes entre ambas, obteniendo una diferencia de 11 días (30%) para la construcción de un módulo de vivienda social.

TABLE I. RESUMEN CRONOGRAMA IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO

Nombre de Tarea	Duración
<b>MÓDULO VIVIENDA SOCIAL IMPRESIÓN 3D CONCRETO</b>	<b>26 días</b>
Movimiento de tierras	3 días
Cimentación	8 días
Estructuras en concreto armado	9 días
Muros	3.5 días
Muros impresos	2 días
Acero de refuerzo (transversal)	1 días
Acero longitudinal en columneta	1 día
Vigas y Losa	1.5 días
IIEE y IISS	4 días

TABLE II. RESUMEN CRONOGRAMA MÉTODO TRADICIONAL

Nombre de Tarea	Duración
<b>MÓDULO VIVIENDA SOCIAL TRADICIONAL</b>	<b>36 días</b>
Movimiento de tierras	3 días
Cimentación	8 días
Solado de cimentación	2 días
Cimiento corrido	6 días
Estructuras en concreto armado	9 días
Columnas	8.5 días
Vigas y Losas	2 días
Muro de Albañilería	2 días
IIEE y IISS	6.5 días

### C. Evaluación de costo

Como parte de evaluación de costo de un proyecto de viviendas sociales masivas, se estableció una cantidad de 200 unidades habitacionales para fin social a manera de poder evaluar la rentabilidad del proyecto en total. Para ello se realizaron 2 flujo de caja, una bajo la implementación de la impresión 3D y la segunda a través del método tradicional.

- Impresión 3D de concreto

Por un lado, para el caso del flujo de caja con impresión 3D, se consideró dentro de la inversión un porcentaje de la adquisición de la impresora 3D (USD 81'600.00), ya que puede ser empleada para otros proyectos. Asimismo, se consideró la instalación de la impresora (USD 3'500.00) y el training (USD 937.50) que recibirá la mano de obra del proyecto debido a la falta de capacitación y conocimiento sobre una tecnología como esta. Para concluir la inversión, se consideró el costo de la adquisición del terreno que equivale a USD 717'946.00, entregados por parte del Estado, y los estudios, la elaboración del proyecto y licencias (USD 436'596.40).

En el caso de los egresos, se obtuvo un monto total de USD 2'440'727.10 dolares ya que se considera el costo de construcción (USD 1'814'400.00), el costo por ventas y marketing (USD 234'435.60), gastos por administración y

financiero (USD 375'691.50), y el mantenimiento de la impresora (USD 16'200.00) que debe ser anual aproximadamente.

Los ingresos se consideran obtenidos por parte de la venta de las viviendas, las cuales por la cantidad de 200 unidades alcanza un valor de USD 5'860'890.00 dólares de acuerdo al prototipo.

- Método Tradicional

Por el otro lado, se cuenta con el proyecto realizado por medio de la construcción tradicional y donde el costo de inversión alcanza un costo de USD 1'178'862.05 en el cual se considera la adquisición del Terreno y los Estudios, proyectos y licencias. Para los Egresos se considera además del costo de construcción, ventas y marketing, y los gastos por administración y financiero, el gasto por contingencias y/o retrabajos que equivale un 0.5% del costo de construcción.

En los ingresos se considera igualmente un único ingreso por la venta de las viviendas, la cual en ambos casos se opta por que tomen un valor igual para poder medir la diferencia en las utilidades.

- Evaluación de rentabilidad

Teniendo establecida la inversión, egresos e ingresos, se evaluó el periodo de 1 año y nueve meses para el proyecto de viviendas masivas, obteniéndose una inclinación más favorable para la impresión 3D de acuerdo a los indicadores de rentabilidad.

En primer lugar, se determinó el valor actual neto el cual alcanzo el valor de USD 717'202.08 en el caso de la impresión 3D, y un valor de USD 433'563.24 en el caso del método tradicional, generando una diferencia en S/. 283'638.84 dólares (39%). La tasa interna de retorno para la impresión 3D y el método tradicional fue de 12% y 5% respectivamente.

Posteriormente se calculó el Margen neto sobre ventas (ROS) y el Margen neto sobre los costos (ROI) resultando para la impresión 3D en un margen de 39% y 63%. En el caso de la construcción tradicional se obtuvo un 28% y 40%.

Finalmente, como utilidad para las empresas constructoras que emplean la impresión 3D, se obtuvo una utilidad después de impuestos que alcanza USD 1'584'831.15 dólares. En el caso del método tradicional se obtuvo un valor de USD 1'161'1754.27 dólares.

#### D. Evaluación de Sostenibilidad

Como parte de lo que se espera identificar en este paper, se realizó un estudio sobre los impactos tanto negativos como positivos de la impresión 3D de concreto, donde a manera de resumen se mencionará los más relevantes en el siguiente tabla:

TABLE III. RESUMEN DE SOSTENIBILIDAD DE IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO

Autores	Resultados
Seyed Hamidreza Ghaffar, Jorge Corker, Mizi Fan	Las materias primas destinada a la FA deben seleccionarse cuidadosamente para que demuestren su impacto como solución medioambiental, ya que la FA es capaz de emplear material reciclado (como residuos de demolición de la construcción) y bioplásticos respetuosos con el medio ambiente.
Paul, S.C., van Zijl, G.P.A.G., Tan, M.J. and Gibson, I	La tecnología 3DPC puede eliminar o reducir significativamente los desechos de la construcción, ya que la cantidad de concreto mezclado y colocado se controla cuidadosamente debido a que la impresora solo imprime donde se desea. Asimismo, utiliza menos material y produce menos residuos.
Shoukat Alim Khan, Muammer Koç, Sami G. Al-Ghamdi	Se reportó una reducción del 85,9% en CO2 emisión y una reducción del 87% en el consumo de energía por parte del sistema de impresión 3D, incluso excediendo los materiales en algunos casos. El impacto medioambiental del producto podría mejorarse en un 15% optimizando el proceso de impresión.

Asimismo, según los estudios se destaca el papel de la impresión 3D en la reutilización de residuos, lo cual se alinea con los estándares que busca alcanzar la economía circular en la construcción en los distintos procesos o fases: producción, planificación y diseño, ejecución, uso, y la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

La identificación de las ventajas en la fase de producción se destaca dado que la impresión 3D facilita la adopción de materiales obtenidos de los RCD para la fabricación y producción de la mezcla imprimible. Su rol en la fase de ejecución es relevante de igual manera debido a la cantidad de material que no se pierde debido a la eficacia del sistema de extrusión. Asimismo, es posible identificar los siguientes aspectos en los cuales toma ventaja:

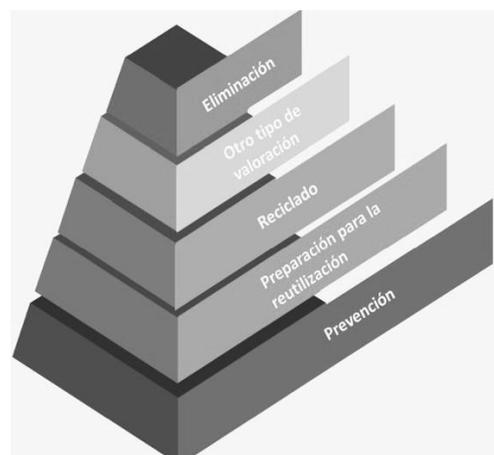


Fig. 3. Diagrama de Economía circular e Impresión 3D de concreto

### E. Evaluación de Productividad

De acuerdo a los casos de viviendas construidas con impresión 3D de concreto nace la cuestión de conocer si efectivamente la fabricación aditiva posee beneficios en cuanto a la productividad en el caso de las viviendas sociales, en la cual prima el bajo costo de construcción y el tiempo de entrega de las viviendas.

Actualmente, múltiples estudios indican que, en el sector construcción a nivel global, la productividad se ha estancado en las últimas décadas, no pudiendo seguir el ritmo de la productividad económica de las otras industrias en términos de mejoras de eficiencia [13, 14]

La impresión 3D de concreto al ser una nueva tecnología basada en la automatización de los procesos ha llamado la atención de investigadores, quienes son conscientes del bajo nivel de productividad laboral en la industria de la construcción y quienes afirman que este proceso apoyado en la tecnología automatizada puede mejorar la productividad.

A continuación, se muestra en la tabla IV algunos de los investigadores de los últimos años que, mediante rigurosos estudios, encuentran un punto a favor de la tecnología automatizada.

TABLE IV. RESUMEN DE REVISIÓN DE LA LITERATURA

Autor	Contenido
Skibniewski & Hendrickson	Investigó los costos y beneficios de aplicar la robótica para el trabajo de acabado de superficies en el sitio, concluyendo que el uso de robots para tareas repetitivas de aplicación de superficies puede ser viable desde el punto de vista técnico y económico.
Najafi & Fu	Determinó que el uso de la robótica para tareas de construcción simples y repetitivas es más económico que los enfoques convencionales.
Castro-Lacouture et al.	Analizó las mejoras de productividad descubriendo que la tasa de producción del proceso automatizado era aproximadamente un 22 % más alta que la convencional.

Tomando en cuenta lo mencionado por la revisión a la literatura, se busca determinar los estudios realizados netamente en base a la impresión 3D de concreto.

En este sentido, algunos estudios encuentran que el objetivo de la mejora de la productividad es reducir el uso de mano de obra en el área de la construcción a un costo razonable [15]. Al ser esta tecnología un medio automatizado de materializar un archivo CAD en una edificación de concreto se considera un beneficio al reducir el personal, manteniendo un número mucho más bajo para el manejo de la máquina y las instalaciones tanto eléctricas como sanitarias.

En resumen, una impresora 3D de concreto presenta un enorme potencial para facilitar la productividad debido a la reducción total de las horas de trabajo empleadas en comparación con el método prefabricado (es decir, 54 frente a 80 horas de trabajo), lo que puede estar relacionado con un relativo alto nivel automático en la fabricación de una estructura impresa en 3D con una intervención manual

reducida. Asimismo, el uso de encofrado eliminado en este proceso mejora aún más su productividad durante la construcción. Un caso de ello se encuentra en el estudio sobre una unidad de baño construido a base de impresión 3D y otra a base de prefabricado. En dicho caso, la mejora de la productividad puede darse ya que, a diferencia de la producción de una vivienda prefabricado, el proceso de desmolde puede simplificarse o incluso eliminarse al fabricar una vivienda impresa en 3D, lo que lleva a una mayor productividad en comparación con la tecnología de prefabricados. Por lo tanto, en comparación con la tecnología de prefabricados y el método tradicional, sobresale la impresión 3D de concreto para la fabricación de componentes de construcción personalizados en lotes pequeños, ya que su productividad es mayor en el área de la construcción [16].

### F. Evaluación de Riesgo

En cuanto a lo que el riesgo es referido, es posible decir que este es un evento incierto o condición que, si ocurre, tiene un efecto positivo o negativo en al menos uno de los objetivos de un proyecto.

Al buscar incrementar la productividad, las constructoras deben llevar una gestión de riesgos que contemple los múltiples eventos que tienen origen en la incertidumbre presente en cada proyecto de construcción. Por tal motivo, existe la necesidad de evaluar aspectos tales como la calidad o la seguridad en obra, ya que así se pueden evitar riesgos de efecto negativo como lo son el riesgo de obtener productos no conformes o los riesgos de seguridad laboral. Asimismo, no debe omitirse el hecho que, al tratarse de viviendas de carácter social, es posible encontrar riesgos de accesibilidad a entornos remotos para el trabajador humano.

Es así que la impresión 3D de concreto, al ser una tecnología que funciona a través de métodos computacionales, puede representar una mejora para dichas situaciones de riesgo. En el caso del riesgo de obtener productos no conformes, ello es dado al no asegurar la calidad y no realizar un correcto seguimiento para cumplir con los requisitos establecidos por los clientes, incurriendo en costos elevados. La ventaja de la impresión 3D es que esta puede construir hasta las formas más complejas sin requerir un gran esfuerzo, así como se limitan los errores humanos ya que la impresión capa a capa a través de la impresora 3D permite que las viviendas sean construidas sin la necesidad de gran cantidad de trabajadores a excepción de quien manipule la impresora y el personal técnico encargado de las instalaciones eléctricas y sanitarias, donde los ductos para la instalación de tuberías para estas especialidades ya son modeladas en el archivo CAD, ganando más tiempo y restando errores en el metrado.

Ahora, en el caso de los riesgos de seguridad laboral, es posible encontrar igualmente una gran ventaja con esta tecnología ya que el incremento de la automatización en la construcción conlleva a una mayor seguridad laboral, pues ante este caso se reducen las situaciones en las que los operarios y trabajadores deban enfrentarse a alguna actividad riesgosa. Actualmente es bien sabido que, en la construcción, especialmente el trabajo con concreto, puede ser peligroso; sin embargo, con la impresión 3D, los riesgos pueden ser reducidos al mínimo, por lo que incluso es posible presentar mucha menos documentación de compensación para trabajadores. El hecho de que este método constructivo no requiera material adicional para la construcción de los elementos, tal y como el encofrado o el uso de andamios para

el trabajo en altura, evita mayores procesos en los cuales analizar y proponer medidas de mitigación de los riesgos, disminuyendo costos. [17]

La disminución de trabajadores humanos en la construcción aditiva se convierte también en una oportunidad al mencionar los ambientes hostiles y de difícil acceso. La construcción en estos casos se vuelve posible debido a que los lugares a los que no se podía acceder por riesgo humano son accesibles ahora por robots o tecnología automatizada con la capacidad de imprimir las futuras viviendas o llevar a cabo un trabajo de pre construcción para hacer estos entornos accesibles sin mayor preocupación. [18]

TABLE V. COMPARACIÓN DE RIESGOS

Método Tradicional	Método Impresión 3D de concreto
Medidas de seguridad y salud costosas durante la ejecución de la obra	Reducción de costos de hasta un 49% en las medidas de seguridad. [19]
Riesgo de operarios en la fase preliminar de obra	Fácil montaje de impresora, con menor esfuerzo y riesgo de operarios en la fase preliminar
Mayor análisis de riesgos y respuesta a estos, repercutiendo en gastos para su mitigación.	La automatización elimina procesos, disminuyendo las situaciones de riesgo, costo y tiempo.
Presencia de No Conformidades en los procesos constructivos y errores en proyectos de mayor complejidad	Sin importar la complejidad, se reduce la presencia de errores al trabajar con una impresora que funciona bajo modelado computacional

### G. Constructabilidad

Finalmente, como resultado de los procesos analizados previamente y consultados para el desarrollo de un proyecto de vivienda social como el que se plantea. Se plasma, a manera de resumen, un flujograma horizontal. Esto, con el objetivo de mostrar un mayor orden en las principales consideraciones a tomar en cuenta en los proyectos. Se han dividido en 6 ítems que deben seguirse para poder implementar eficientemente esta innovadora tecnología. Las mencionadas van desde el Diseño, el Software, el Sistema Constructivo, la Impresora 3D de concreto, el Material y finalmente, el proceso constructivo.

De acuerdo a la revisión de la literatura y múltiples investigaciones, se desataca principalmente el rol de la impresión 3D de concreto en el proceso de planificación que involucra el Diseño, el establecimiento del sistema constructivo y los Softwares que acompañaran toda la etapa que muestra la rentabilidad del proyecto y elaboración de planos.

Asimismo, para el caso del proceso constructivo se obtuvo que existe la compatibilización de la impresión 3D de concreto con elementos prefabricados y los elementos construidos a través del método tradicional, por lo que para dicho caso se presenta el siguiente flujograma del proceso constructivo que se tomó en cuenta igualmente para la definición de las partidas en el cronograma mencionado anteriormente.

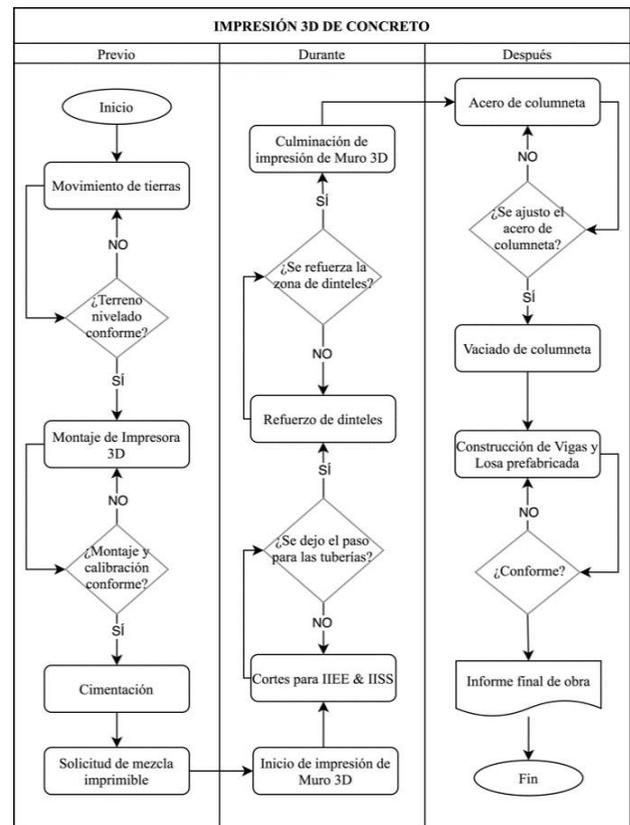


Fig. 5. Flujograma de proceso constructivo con impresión 3D

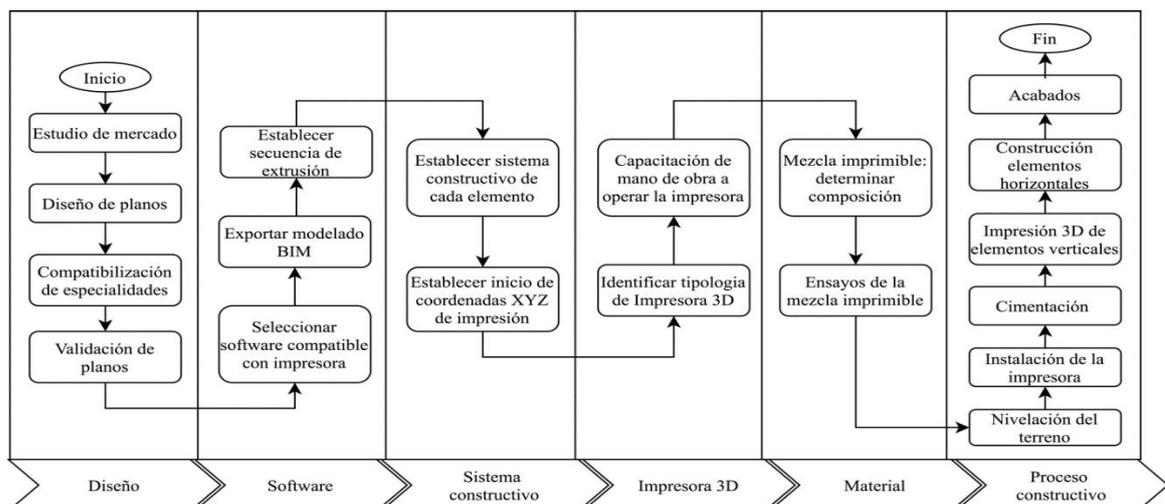


Fig. 4. Flujograma de proceso metodológico de la impresión 3D de concreto

#### IV. VALIDACIÓN

Para lo correspondiente a la validación de los resultados obtenidos, se optó por emplear el método de juicio de expertos. Con este método se contactó con 17 especialistas de ingeniería civil de 7 países para que respondan 2 preguntas de validación. Las preguntas fueron enviadas a los expertos mediante la plataforma de “Google Forms”, en la cual, previo a un eficiente diseño de ambas preguntas se procedió a hacer el envío correspondiente.

Una vez los 17 especialistas respondieron la encuesta, se procedió al procesamiento de los resultados obtenidos para poder realizar las gráficas resumen para un mejor entendimiento de las respuestas obtenidas.

Con respecto a la primera pregunta planteada, se comenzó cuestionando a los especialistas sobre la predisposición a realizar proyectos horizontales, con referencia a la construcción de viviendas masivas de interés social. La respuesta se muestra en el gráfico a continuación:

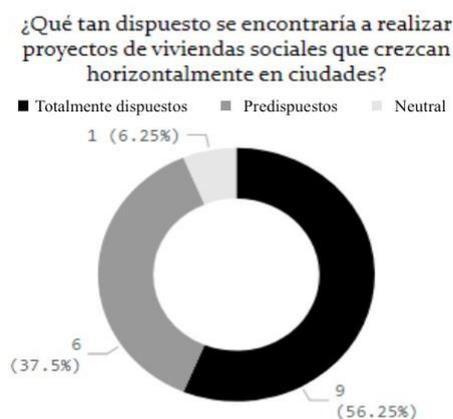


Fig. 6. Resultados de la Pregunta N° 1 de la Encuesta de validación

Los resultados se reflejan con un 56.25% que se encuentra totalmente predispuesto y un 37.5% que se encuentra predispuesto. Ascendiendo a un total de 93.75% de validación de esta pregunta, puesto que, la escala 4 y 5 se consideran como validación de la pregunta en cuestión.

Con respecto a la segunda y última pregunta, esta está relacionada a la predisposición de los expertos en optar por esta tecnología para la mejora en la entrega de viviendas sociales, teniendo en cuenta un comparativo de tiempo mostrado párrafos arriba en el presente paper. Y se obtuvo lo siguiente:



Fig. 7. Resultados de la Pregunta N° 2 de la Encuesta de validación

De la escala de Likert empleada, se valida el primer ítem correspondiente al tiempo puesto que, el 47.06% de los expertos optó por la escala 4 y el 52.94% por la escala 5, siendo en total un 100% de los expertos que se encuentra predispuesto a su optar por el empleo de esta tecnología.

#### V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después del planteamiento de la metodología mostrada párrafos arriba, se consiguieron los resultados establecidos en el presente estudio. La secuencia de actividades fue eficiente para que se consigan, en cadena, los resultados deseados para poder analizar la adopción del uso de la impresión 3D de Concreto.

El planteamiento del prototipo se realizó de un nivel, como es usual la entrega de viviendas sociales. Este paso fue muy importante porque permite definir el tipo de impresora a emplearse, y demás parámetros a considerar para el respectivo análisis económico que se realizó.

Bajo la misma línea de lo antes mencionado, la realización de un cronograma para la metodología tradicional y uno para la implementación de la impresión 3D de concreto fue primordial para poder evaluar, en primer lugar, el aspecto económico que beneficia tanto a la empresa constructora como a los beneficiarios de los programas sociales habitacionales puesto que, se pueden ofertar las viviendas a un menor precio sin dejar de tener la rentabilidad deseada por la empresa constructora.

Los proyectos con la implementación de la impresión 3D de concreto obtienen una utilidad neta favorable en más de un millón de dólares a comparación del método tradicional, esto en base al análisis económico realizado en base a los principales parámetros considerados en la inversión inicial, ingresos y egresos correspondientes a los proyectos en cuestión.

Adicionalmente, con la elaboración del cronograma en mención, se observa que, se tiene una mejora en el tiempo de entrega de las viviendas, ya que se optimiza el tiempo de construcción y se construye masivamente de forma más eficiente y veloz.

Los resultados correspondientes al aspecto de la sostenibilidad del empleo de esta tecnología, son controversiales aún. Si bien, hay indicios de que la impresión 3D de concreto disminuye los niveles de contaminación en su uso, así como, en la disminución del uso del encofrado; no se ha comprado en su totalidad lo mencionado. No obstante, se tiene el primer acercamiento para poder investigar más a profundidad este aspecto que arroja resultados positivos, especialmente al emplear la denominada “economía circular”.

Con respecto a la validación realizada, se escogió a 17 especialistas, que han tenido experiencia y tienen conocimiento de esta tecnología en cuestión. El contacto con especialistas de 7 países de dos continentes (Europa y América) le aporta mucha significancia a la presente investigación. Se ha validado las dos preguntas plasmadas con más de un 90% de aprobación en ambas.

Es importante también, mencionar las limitaciones que se tienen, ya que este paper es un primer acercamiento al planteamiento del uso de esta tecnología en Lima, Perú, específicamente, ya que, este país aún no posee una impresora 3D de concreto experimental, ni industrial. Por lo

mencionado, se ha realizado un análisis teórico de la propuesta planteada.

## VI. CONCLUSIONES

En conclusión, se encuentra a la adopción de la impresión 3D de concreto como una buena alternativa técnica para la construcción de viviendas sociales masivas debido a los beneficios en tiempo, costo y sostenibilidad.

En el caso del tiempo de construcción del módulo de vivienda social propuesto a manera de prototipo digital 3D, se encuentra que la elaboración de un cronograma para la comparación de la adaptación de la impresión 3D de concreto es un medio útil para poder analizar las diferencias de este método con el tradicional, ya que permite una comparación minuciosa de las partidas que componen el proyecto y un mayor análisis sobre los recursos a emplear en cada etapa del proceso constructivo. Del cronograma realizado, se puede evidenciar la diferencia de días de construcción de la impresión 3D vs el método tradicional, el cual se reduce en 30%, siendo más beneficioso para la impresión 3D y para quienes se encuentran interesados en la elaboración de proyectos más eficientes.

En el caso del costo, es posible identificar un mayor beneficio por parte de la impresión 3D. Ello debido al valor de retorno que este genera, el cual se diferencia del método tradicional en 39%. La tasa interna de retorno es asimismo un indicador que muchos inversionistas toman en cuenta debido al costo de oportunidad que involucra. En este caso, la TIR resulta igualmente favorable para la impresión 3D de concreto debido a una diferencia del 7%. Es así que la impresión 3D de concreto se muestra como una opción rentable para las empresas que opten por adoptarla a futuros proyectos de viviendas sociales masivas, donde el tiempo también juega un rol importante para evaluar en cuanto tiempo la inversión retornará.

En el caso de la sostenibilidad se encuentra a través de la revisión de la literatura que los principales beneficios son la reducción de residuos, la disminución de la emisión de CO<sub>2</sub> de hasta 85.9% y la posibilidad de emplear materiales reciclables encaminando los futuros proyectos a los conceptos de economía circular, un aspecto muy importante a tomar en cuenta en la actualidad debido a los retos frente al cambio climático y las grandes emisiones de materiales como residuos por parte de la construcción.

A su vez, en cuanto al análisis de productividad realizado se concluye que la implementación de esta tecnología de impresión 3D de concreto tiene un alto impacto positivo a aumentar el nivel de productividad de los proyectos. Esto se basa principalmente en la reducción de la mano de obra, lo que disminuye trabajos no contributivos y, a su vez, al automatizar un proceso aumenta considerablemente el nivel de producción masiva de viviendas. Adicionalmente genera eliminación del proceso del encofrado, evitando retrasos no productivos que suelen aparecer en este proceso.

El análisis de Riesgos refiere un punto a favor de la impresión 3D, ya que, disminuyen los riesgos por error humano o accidentes ocupacionales que suelen existir en las construcciones tradicionales, ya que la automatización elimina procesos, disminuyendo las situaciones de riesgo, costo y tiempo.

Finalmente se concluye que la investigación es viable respecto al uso de la impresión 3D de concreto, debido a que

se obtuvieron resultados favorables de la constructibilidad para optar por esta tecnología en los proyectos de construcción de viviendas sociales masivas.

## VII. RECOMENDACIONES

Se espera que una materialización del prototipo permita poder evaluar aspectos no vistos durante la investigación, debido a que es una tecnología muy nueva y no se tienen modelos a gran escala.

Asimismo, se espera que se estandarice una norma técnica que permita establecer los límites y parámetros de los ensayos y el modelamiento estructural de las viviendas, ya que como tal no pueden modelarse bajo un sistema estructural conocido y es importante el rol que involucra en el modelado sismorresistente.

## REFERENCIAS

- [1] Quintero, D. (2016) Vivienda social alternativa. Recuperado de <http://dspace.uca.edu.ec/bitstream/123456789/26214/1/tesis.pdf> [Consulta: 4 de abril del 2021]
- [2] Camara Peruana de la Construcción, "Informe Economico de la construcción Febrero 2017," unpublished.
- [3] Forcael, Eric, Isabella Ferrari, Alexander Opazo-Vega y Jesús A. Pulido-Arcas 2020. "Construcción 4.0: Una revisión de la literatura" Sostenibilidad 12, no. 22: 9755. <https://doi.org/10.3390/su1229755>
- [4] Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B., A review of the current progress and application of 3D printed concrete, Composites: Part A (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>
- [5] De Schutter, G., Cement and Concrete Research (2018), <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- [6] Seyed Hamidreza Ghaffar, Jorge Corker, Mizi Fan, Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, Automation in Construction, vol. 93, pp. 1-11, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>.
- [7] Y.Weng, M. Li, S. Ruan, T. Neng Wong, M.Jen Tan, K. Leong Ow Yeong, S. Qian, Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.iclpro.2020.1212450959-6526>
- [8] Berlak, J., Hafner, S., Kuppelwieser, V. (2020), Impactos de la digitalización en la productividad: un enfoque y una evaluación basados en modelos en la industria de la construcción de edificios de Alemania, Planificación y control de la producción. <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/09537287.2020.1740815>
- [9] López, E., El Método Delphi en la investigación actual en educación: una revisión teórica y metodológica. DOI: 10.5944/educXX1.15536
- [10] Forcael, E.; Pérez, J.; Vásquez, Á.; García-Alvarado, R.; Orozco, F.; Sepúlveda, J. Development of Communication Protocols between BIM Elements and 3D Concrete Printing. Appl. Sci. 2021, 11, 7226. Disponible en <https://doi.org/10.3390/app11167226>
- [11] Wu, P.; Wang, J.; Wang, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. Autom. Constr. 2016, 68, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- [12] Icon Build, ICON + New Story + ECHALE Unveil First Homes in 3D-Printed Community, 2019. <https://www.iconbuild.com/updates/icon-new-story-echale-unveil-first-homes-in-3d-printed-community>
- [13] T. Bock, The future of construction automation: technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics, Autom. Constr. 59 (2015) 113–121, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.022>
- [14] Bankvall, L., Bygballe, L.E., Dubois, A., Jahre, M., 2010. Interdependence in supply chains and projects in construction. Supply Chain Manag.: Int. J. 15, 385e393.
- [15] Chia, S.Y., 2011. Foreign labor in Singapore: rationale, policies, impacts, and issues. Philippine J. Dev. 38, 105e133.

- [16] Yiwei Weng, Mingyang Li, Shaoqin Ruan, Teck Neng Wong, Ming Jen Tan, Kah Leong Ow Yeong, Shunzhi Qian, (2020) Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>.
- [17] Campillo, M., 2017. Prefabricacion en la arquitectura: Impresión 3D de Homigón. Disponible en: [https://oa.upm.es/47556/1/TFG\\_Campillo\\_Mejias\\_Miriam.pdf](https://oa.upm.es/47556/1/TFG_Campillo_Mejias_Miriam.pdf)
- [18] Rios Quiroz, M., 2018. Propuesta de mejora en la productividad de mano de obra y equipos del proceso de ejecución de obra del área de operaciones en empresa especializada en construcciones civiles de instalación del servicio de agua en sistemas de riego . [en línea] Hdl.handle.net. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/622894> [Consultado el 17 de enero de 2022]
- [19] Be More 3D, 2021. Curso “Innovación en el concreto mediante la construcción 3D: Tecnología, sistemas estructurales y nuevos usos”