



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Trabajo Final de Grado

FABRICACIÓN ADITIVA CON HORMIGÓN

Autor: Enric Martorell Pons

Tutor: David López López

Barcelona, 02/2022

Resumen

El siguiente trabajo estudia el potencial que tiene la introducción de la Fabricación Aditiva (FA) comúnmente conocido como impresión 3D en la arquitectura y el sector de la construcción.

La Fabricación aditiva, como ya ha ocurrido en la automoción, la aeronáutica y otras disciplinas, puede marcar una revolución en el sistema de diseñar y construir los proyectos. Dicho proceso podría representar uno de los mayores avances en la construcción de las últimas décadas. Este trabajo se investiga los avances estas últimas décadas y los aspectos más relevantes de la tecnología digital en la arquitectura, lo que permite entender su evolución y aplicaciones, hasta un estado actual del arte del cual se estudian los casos más relevantes, explicando sus técnicas y metodologías constructivas.

Se comparan 2 puentes para observar las diferencias y mejoras que se han generado en estos años utilizando la Fabricación aditiva en construcciones.

Una vez obtenidos los resultados, se hace una reflexión acerca del uso y desarrollo de estas tecnologías, y se comentan las posibilidades que puede generar en un futuro cercano.

Palabras clave: Impresión 3D, Fabricación Aditiva, Hormigón, Diseño digital.

Tabla de contenido

1. Introducción	3
1.1. Motivación	4
1.2. Objetivos	5
1.3. Metodología	5
2. Procesos en la Fabricación digital	6
2.1. Fabricación aditiva, clasificación y características	7
2.2. Fabricación aditiva en la construcción	9
2.2.1. <i>Countour crafting</i>	9
2.2.2. <i>D shape</i>	11
2.2.3. <i>3D Concrete printing</i>	12
2.2.4. <i>Comparacion</i>	14
2.3. Arquitectura de las impresoras 3D para la construcción	16
2.4. Aportaciones de la FA en la arquitectura	20
3. Máquina de impresión 3D	22
3.1. Requisitos del hormigón para impresión	25
4. Comparación entre puentes	25
4.1. Diseño	26
4.2. Material	29
4.3. Sistema de impresión	30
4.4. Construcción	32
4.5. Conclusiones	34
5. Conclusiones	35
6. Bibliografía	36

1 Introducción

Para entender la necesidad de usar la Fabricación Aditiva (FA) o impresión 3D en la construcción hay que entender el proceso de evolución que ha habido desde la introducción del Diseño Asistido por Computadora (CAD, *Computer Aided Design*).

Durante las últimas décadas los arquitectos han ido integrando las herramientas digitales en sus proyectos a medida que avanza la tecnología. De las primeras muestras más importantes cabe destacar la Opera de Sidney (1959-73), diseñada por el arquitecto Jhon Utzon, que marcó un referente sobre cómo los métodos de representación y análisis estructural afectan en la concepción y construcción de los proyectos en arquitectura. [Rey 2013]

Con la introducción de los ordenadores personales en los 80, empezó la realización del dibujo digital 2D, que hasta el momento se realizaba manualmente. Con el ordenador se optimizaron y ampliaron las posibilidades en la presentación de documentos arquitectónicos, además de facilitar mucho el almacenamiento de información gráfica y la posibilidad de rectificar.

Con el tiempo la tecnología mejoró y permitió ilustrar propuestas en 3D, cada vez más sofisticadas y realistas, hasta convertirse en una alternativa clara a las maquetas físicas.

A finales del siglo XX se empezó a utilizar la tecnología CAD activamente en arquitectura. Un referente en la aplicación de la fabricación digital a la construcción fue el estudio Ghery & Partners con el “Pez Dorado” (1992) [Figura 1] o el Museo Guggenheim de Bilbao (1993-97).

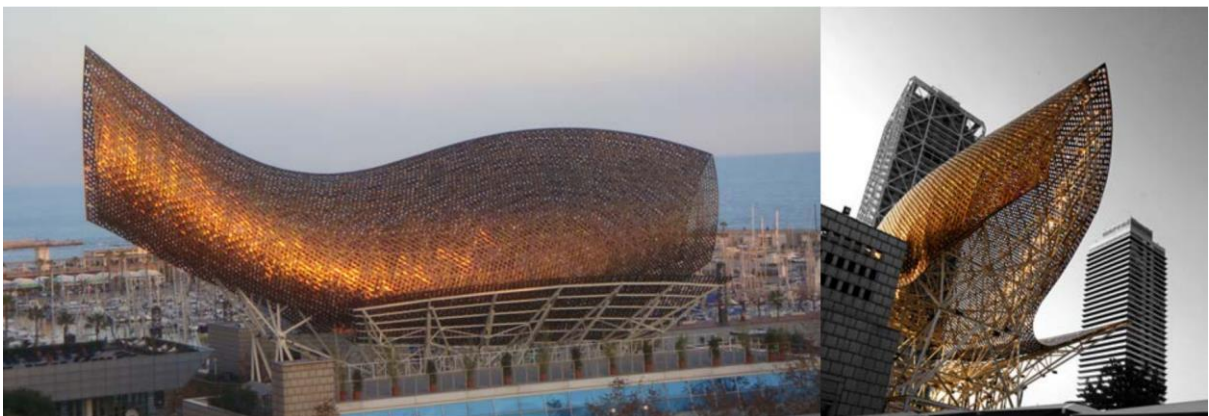


Figura 1 Estructura de pez de Frank O.Gehry en Barcelona, una de las primera estructuras arquitectónicas utilizando herramientas CAD-CAM.

El siglo XXI ha dado lugar a muchas obras que exploran estas posibilidades, ya que a nivel constructivo prácticamente cualquier componente puede ser concebido, el problema recae en que estos componentes fuera de lo “estándar” suelen exigir un alto

presupuesto al tener que hacerse específicamente para un solo proyecto, aquí entra la fabricación aditiva, un método que puede llegar a solucionar este problema al tener una mayor flexibilidad y no tener las limitaciones de la construcción tradicional. Un ejemplo de esto son el museo Kunsthaus en el distrito de Lend en Graz, Austria. [Figura 2] y el Estadio Olímpico Bird Nest en Pekín. [Figura 3]



Figura 2 (izquierda) Museo Kunsthaus de Graz (2003) de Peter Cook y Colin Fournier.
Figura 3 (derecha) Estadio Olímpico Bird Nest (2007) de Herzog & De Meuron.

Además, la FA abre una ventana para la exploración de un nuevo sistema no únicamente para abaratar costes, sino que además reducimos el material necesario para la construcción, ya que al construir los elementos teniendo libertad en la forma, estos no tienen la necesidad de ser masivos con el “tradicional” encofrado, pudiendo ser huecos por dentro ahorrando material y aligerando la estructura.

1.1 Motivación

Vivimos en una época de constante evolución, cada vez mejorando más las tecnologías que abren muchas puertas al diseño arquitectónico. Los arquitectos han seguido desarrollando cada vez propuestas más complejas, mientras que los sistemas generales de construcción comunes siguen limitando el proceso creativo al ser poco flexible y no evolucionar conjuntamente con las nuevas tecnologías (exceptuando edificios singulares con grandes presupuestos).

En este panorama actual ¿No puede la impresión 3D abrir nuevos caminos en la manera de enfocar los proyectos arquitectónicos? Y aunque la FA también tiene sus limitaciones, ofrece un abanico más amplio de posibilidades que la construcción tradicional entre las cuales destacan: una reducción de residuos; un incremento en la seguridad de las obras; una construcción más sostenible, al poder construir estructuras huecas; producción en masa; una reducción en el coste; y mayor velocidad en la construcción. De aquí nace la idea de realizar este estudio para entender mejor el funcionamiento y las posibilidades que ofrece.

1.2 Objetivos

El objetivo general de la tesina es mejorar el entendimiento de la Fabricación Aditiva. En concreto:

- Entender las bases y el funcionamiento de la fabricación aditiva.
- Las aplicaciones y usos que la fabricación aditiva con hormigón tiene en la arquitectura.
- Tener un conocimiento del arte actual dentro de la arquitectura realizada con esta técnica.
- Conocer las posibilidades y aportaciones que esta puede llegar a proveer en un futuro a corto plazo.

1.3 Metodología

El desarrollo del trabajo se hace a partir de una mezcla de búsquedas teóricas y un análisis documental de la técnica a través de casos ya realizados, con el objetivo de extraer las ventajas y desventajas de la inclusión de la fabricación aditiva en la industria de la construcción.

Para ello se hará una introducción general sobre la fabricación digital, una investigación sobre la Fabricación Aditiva (FA) centrándose en el uso del hormigón, y una revisión crítica de los antecedentes que permita entender el contexto histórico y los últimos avances de la técnica.

Mediante un estudio de los casos más relevantes en la actualidad, se busca extraer una serie de datos, que nos va a proporcionar indicaciones de los elementos y técnicas más propensos a ser utilizados en la fabricación aditiva.

Se compara dos casos reales, uno situado en Países Bajos y otro en China, de puentes construidos con Fabricación Aditiva usando hormigón, para ver la evolución en el enfoque y técnicas en este tipo de construcciones, ya que el caso de Países Bajos fue uno de los primeros puentes construidos con esta técnica, mientras que la construcción del puente de China ya tiene una serie de referentes que lo llevan a tomar ciertas decisiones para mejorar y optimizar el proceso.

Tras esta investigación, analizar los resultados obtenidos para obtener conclusiones sobre la viabilidad de esta técnica y su implementación sistemática en la arquitectura actual.

2. Los procesos en la fabricación digital.

La fabricación digital se puede dividir en 3 tipos de procesos: sustractivos, aditivos y formativos. [Benjamin, Nam, Fereydoon & Ali 2021]

Los procesos sustractivos engloban las tecnologías de corte y fresado. Estos empiezan con un bloque sólido del cual se va eliminando el material sobrante hasta conseguir el resultado deseado. Con este método los materiales más utilizados son madera o metal. Puede realizarse tanto manualmente como por control numérico computarizado (CNC), siendo la segunda la más eficiente y precisa.



Figura 4 Máquina de fabricación sustractiva.

Uno de los principales problemas de la fabricación sustractiva es la producción de una considerable cantidad de residuos, que en muchos casos es material desperdiciado que no puede ser reutilizado sin un tratamiento previo. [Stephen, Zicheng, Vimal & Alborz, 2015]

Los procesos formativos son aquellos que dan forma al material mediante modificaciones como doblarlo o curvarlo, sin añadir ni quitar materia, solamente usando calor o presión para conseguir la deformación deseada. Suelen utilizarse materiales que pueden manipularse pasado su límite elástico. Los materiales más utilizados son metales y plásticos.



Figura 5 (Izquierda) Sistema de plegado de chapas CNC.

Figura 6 (derecha) Máquina curvadora de tubo.

Mientras que los procesos substractivos y formativos son considerados más tradicionales, los procesos aditivos denominados como fabricación aditiva en el ámbito industrial y profesional, son más comúnmente conocidos como impresión 3D en un ámbito más informal y a nivel de usuario. Estos están evolucionando rápidamente con posibilidades todavía por explorar. [Stephen, Zicheng, Vimal & Alborz, 2015]

Los procesos aditivos que explicaremos más adelante con mayor profundidad, son aquellos que se crean a partir de un modelo 3D, a base de añadir material generalmente con finas capas que se van uniendo para generar el objeto. Siendo el plástico el material más usado en este grupo.

2.1 Fabricación aditiva, clasificación y características

Los sistemas de fabricación aditiva se diferencian según el proceso de unión del material del objeto que se vaya a producir y de dicho material. Los más relevantes serían:

La estereolitografía (SLA) fue la primera en desarrollarse, por el ingeniero Charles Hull. Consiste en añadir resina dentro de un tanque con polímero líquido, y mediante luz ultravioleta esta solidifica. Y así sucesivamente se van solidificando las capas hasta crear un objeto sólido.



Figura 7 (Izquierda) Ing. Charles Hull.
Figura 8 (derecha) Estereolitografía (SLA) Rayo láser sobre resina.

El modelado por deposición fundida (MDF) utiliza un filamento plástico generalmente, que desde una boquilla se calienta, funde el material y lo reparte con una trayectoria específica determinada por el software utilizado. La patente de este sistema expiró en el año 2009, lo que ha provocado una cantidad muy elevada de nuevos formatos de impresoras 3D por FDM, que se ha mantenido en constante desarrollo y ha creado una comunidad que ha tenido una gran repercusión no sólo a nivel industrial y profesional, sino que al haber mejorado y abaratado los costes de las máquinas a pequeña escala muchos usuarios pueden permitirse una máquina de uso personal.

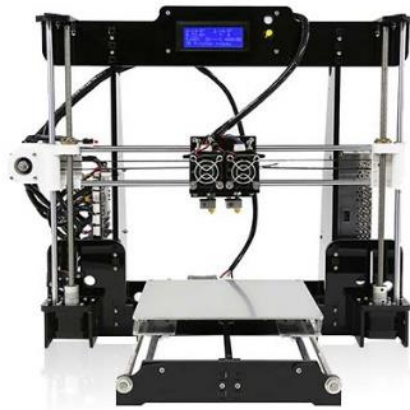


Figura 9. Impresora económica 3D

De este sistema derivan las tecnologías de fabricación aditiva con hormigón como el *Countour crafting* el cual se describe con más detalle posteriormente.

El sinterizado selectivo por láser (SLS) utiliza una capa fina de polvo que con un láser de alta potencia consigue que se fusionen y solidifiquen las capas una por una. A diferencia del modelado por deposición fundida, no necesita estructuras de soporte (las cuales se construyen conjuntamente con el modelo para poder soportar el peso del objeto durante la construcción y que el material todavía fundido tenga un lugar sobre el que reposar, hasta convertirse en sólido), ya que el mismo polvo no solidificado sostiene el material.



Figura 10. Impresora de Sekective laser Sintering

Sigue una lista larga de técnicas como *Direct Metal Laser Stering (DMLS)*, que funciona igual que el *SLS*, pero con la diferencia que usa polvos metálicos en vez de usar un componente termoplástico, o *Laser Poder Forming (LPF)*, que funciona como el *MDF*, pero este utiliza polvo metálico y temperaturas superiores para fundir el metal. Etc. [Malé-Alemany, 2015]

2.2 Fabricación aditiva en la construcción

A través del estudio y avance en los procesos de la FA, la industria de la construcción ha desarrollado nuevos sistemas, que permiten obtener elementos a gran escala con hormigón u otros materiales, adecuados para la arquitectura. [Amado, 2019]

De estos sistemas destacan 3 tecnologías de producción a gran escala en la fabricación aditiva cada uno usa distintas técnicas y materiales, lo que resulta en ventajas diferentes, pero todas son aptas para la creación de proyectos enteros o elementos en la arquitectura. [Lim et al, 2012]

2.2.1 *Contour crafting* (CC)

El ingeniero iraní Behrokh Khoshnevis, buscando una forma de construir casas estables de forma rápida y económica después de que un terremoto destruyera su ciudad natal Bam, en Irán, creó el *Center for Rapid Automated Fabrication Technologies* (CRAFT) en la universidad de California del Sur en los Angeles.

El CRAFT se propuso como objetivo construir casas personalizadas en 1 solo día, intentando reducir los costes, residuos y daño medioambiental. Con esta idea, Khoshnevis inventó el *Contour Crafting*, el cual junto con *D-shape* y el *Freeform Construction Project* (2.3.2 y 2.3.3) han sido los pioneros para aplicar la FA en la construcción. [Malé-Alemay, 2015]

El CC está basado en *MDF* pero a diferencia de este, la boquilla [Fig 13 A] está equipada con dos paletas [Fig 13 B] para crear superficies suaves y precisas. Primero se construyen los bordes exteriores [Fig 13 C] para posteriormente verter otro tipo de material cementoso para llenar el volumen interno formado por estos [Fig 13 D]. Este sistema necesita una máquina que utiliza pórticos que se mueven en dos pistas paralelas, que se instalan in-situ en el lugar de la construcción. [Amado, 2019]



Figura 11 (Izquierda) Khoshnevis y su impresora CC.
Figura 12 (derecha) Propuesta de impresora CC a gran escala.

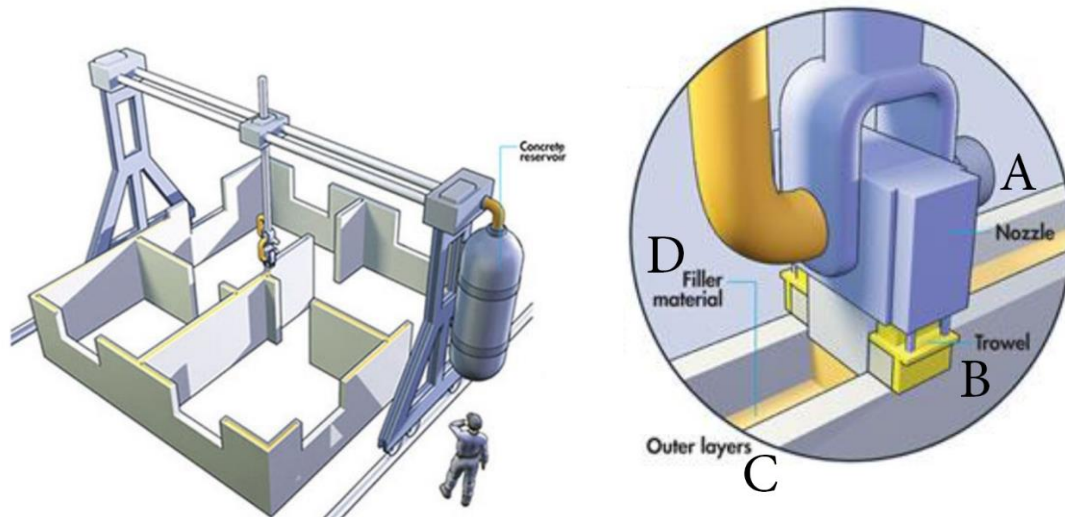


Figura 13. Detalle de las partes de la boquilla utilizada en CC.

En vez de rellenar el interior con un material cementoso también es posible con el material utilizado en los bordes exteriores hacer una pared interior que vaya de lado a lado para darle estabilidad al muro.



Figura 14. Detalle de las partes de la boquilla utilizada en CC.

En 2014, una compañía en China construyó 10 casas de unos 200 m² en 24 horas [Fig 15], usando esta última variante. [Rudenko A. 2015]



Figura 15 Proyecto de casas prefabricadas y elaboradas por FA en cemento por la empresa china WinSun.

2.2.2 D-shape

El ingeniero italiano Enrico Dini se inspiró en el sistema SLS para llevar a cabo “una gran impresora 3D que une selectivamente arena con aglutinante a base de magnesio para crear objetos con aspecto de piedra”. [Guo, Wand and Yang, 2018]

Finalizado en 2008, similar al proceso de impresión SLS, este sistema consiste en “la inyección de una resina estructural sobre sucesivas capas de arena en polvo de entre 4 y 10 mm de espesor, de manera casi ininterrumpida y a un ritmo de entre 150 mm y 200 mm en altura por día de trabajo”. [Soler, 2013]

Una vez finalizado la repetición del proceso por capas, se puede sacar el objeto consolidado y reutilizar la arena sobrante para el siguiente objeto.

El material obtenido después de la petrificación se comporta como un mineral, con una estructura microcristalina, que a diferencia del hormigón no necesita de refuerzos, ya que tiene una resistencia considerable a tracción.

La estructura de la impresora está hecha en aluminio para que sea posible transportarla directamente a la obra y poder montarse en pocas horas por 2 operarios. Tiene un tamaño de 2,4 m x 4 m. Para demostrar su viabilidad Dini empezó a colaborar con arquitectos. El caso más ejemplar es la escultura Radiolaria diseñada por Andrea Morgante. [Malé-Alemany 2015]



Figura 16. Impresora D-Shape

En 2010, la Triennale Milano encargó a Dinitech la impresión 3D de la primera casa hecha de una sola tirada. [Fig 13] El diseño se mantuvo al mínimo para referirse al concepto de

casa: 4 paredes y un techo. Esa pequeña casa contiene un baño y un espacio de cocina y dormitorio. Se finalizó en 3 semanas y fue expuesto en la Triennale di Milano, actualmente está en la cima de una colina de la propiedad del arquitecto Ferreri. [d-shape.com]



Figura 17 Una casa hecha de una sola pieza con *D-shape*

2.2.3 3D Concrete printing (3DCP).

El sistema *3D Concrete Printing*, fue iniciado por la Universidad de Loughborough, donde se encuentra el *Additive Manufacturing Research Group (AMRG)*, un grupo de investigación que siempre ha estado en la cabeza de los procesos de FA. El ingeniero Ruper Soar junto con Richard Buswell, dirigieron el llamado *Freeform Construction Project*, creado el 2005. Al cabo de unos años cuando el grupo se separó, Buswell siguió con el proyecto el cual pasaría a llamarse *3D Concrete Printing*. [Buswell, Soar, Gibb, and Thorpe 2006]

Este sistema se basa en la tecnología de extrusión 3D, en comparación al CC tiene una menor resolución, por lo que tiene menos calidad en los acabados, pero a cambio muestra una mayor versatilidad en sus formas, lo que permite una geometría más complicada. Esta tecnología a diferencia del CC no se centra en el acabado de obras enteras sino en la fabricación de componentes como paneles y muros. [Amado, 2019]



Figure 18: 3DCP Instalación 3DCP en la TU Eindhoven

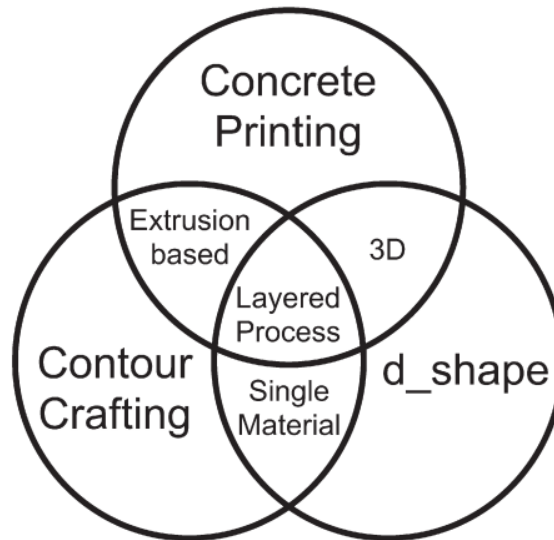
En 2016, WinSun construyó la primera oficina impresa en 3D del mundo, de 250 m². Se imprimió utilizando un brazo robótico móvil. Su diseño demuestra el potencial que ofrece esta tecnología y abre una puerta al diseño de servicios como agua, electricidad y aire acondicionado. A pesar de que se tardó 17 días en la construcción, la compañía asegura que el precio de la mano de obra no es ni la mitad de lo que hubiera costado con métodos “tradicionales” de construcción. [Hamidreza, Corkerb and Fana 2018]



Figura 19: Oficina en Dubai construida por WinSun

2.2.4 Comparación

Estos 3 sistemas han demostrado exitosamente que son adecuados para la construcción y arquitectura, ya que los 3 pueden imprimir componentes de gran tamaño. A continuación se va a comparar ciertos aspectos entre los sistemas.



Similitudes en las tecnologías de fabricación aditiva [Lim et al, 2012]

En lo que respecta al lugar donde ocurre el proceso de impresión, CC está pensado para la construcción *in-situ* de un cabezal de deposición, en un pórtico o grúa el cual procederá a imprimir la estructura, a diferencia de *D-Shape* y *3D Concrete Printing* los cuales son procesos de fabricación fuera de la obra, aunque el motivo es para tener un ambiente controlado, ya que en caso de ser necesario estos podrían montarse *in-situ*.

Al crear objetos 3D se puede dar la necesidad de tener un voladizo o sobresaliente que necesite un soporte inicial para aguantar su propio peso, hasta que el material se endurezca y tenga la suficiente fuerza para autosostenerse, para abordar este problema la FA propone 3 soluciones. [Lim et al, 2012]

- Que el mismo material genere una estructura muy fina para romperla una vez se ha completado la construcción.
- Utilizar un segundo material que sea fácil de eliminar una vez terminado el proceso.
- En el caso de sistemas que usen materiales en polvo, el mismo material no consolidado se usa como soporte provisional.

Countour Crafting se centra en construir elementos verticales que trabajan a compresión, en el caso de necesitar una puerta o ventana se coloca un dintel arriba del hueco necesario, para que pueda continuar la construcción del muro. *D-Shape* utiliza el polvo no consolidado

como soporte provisional. Mientras que *3D Concrete printing* usa un segundo material fácil de eliminar, muy parecido al sistema que se usa en el modelado por deposición fundida.



Figura 20: Proyecto de la compañía XtreeE, en la izquierda podemos observar la estructura con soportes provisionales, en la derecha el resultado final.

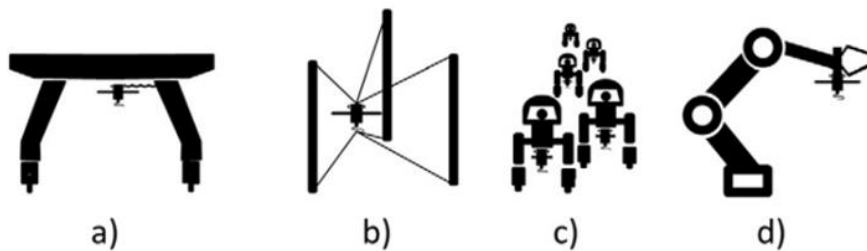
En cuanto al espesor mínimo de las capas necesario varía entre 4 y 6 mm en *D-Shape* y *3D concrete printing* mientras que en *CC* es de unos 13 mm [ISARC 2004]. Estos serían valores estándar, ya que este número se debe a la velocidad de construcción y al número de “capas”(altura) requeridas.

En relación al material, en las 3 técnicas este se endurece a través de un proceso de curado, en el caso de *CC* y *3D Concrete printing* son procesos húmedos mientras que *D-Shape* sería considerado un proceso “seco”. A continuación podemos ver las propiedades de los distintos materiales.

Proceso	Countour Crafting	3D Concrete Printing	D-Shape
Uso de molde	Si (Forma parte del modelo final)	No	No
Material usado	Mezcla de mortero para el molde Cemento con añadidos	Hormigón para impresión	Arena y piedra en polvo
Aglutinante	Ninguno	Ninguno	Cloro líquido
Diámetro de la boquilla	15mm	9-20mm	0,15 mm
Número de boquillas	1	1	6300
Espesor de las capas	13 mm	6-25 mm	4-6 mm
Propiedades mecánicas	Probado con una fuerza completamente vertical		
Fuerza a compresión	Desconocido	100-110 MPa	235-242 MPa
Fuerza a flexión	Desconocido	12-13 MPa	14-19 MPa
Tratamiento	Refuerzo cada 125mm Rellenar el molde con cemento cada 125mm	Refuerzo despues de la impresión	Comprimir cada capa a priori Eliminar el material sin usar al finalizar
Ventajas	Superficie lisa	Gran resistencia Menor trabajo por refuerzo	Gran resistencia
Desventajas	Conexión débil debido al relleno por intervalos	Impresión limitada a 5,4m x 4,4m x 5,4m (H)	Impresión limitada al tamaño del portico Proceso relativamente lento Eliminar el material no usado

2.3 Arquitectura de las impresoras 3D para la construcción

Las tecnologías de fabricación aditiva fueron pensadas para un cierto “tamaño”. Por lo que llevarlas a la gran escala siempre ha sido el mayor desafío. Las tecnologías vistas anteriormente pueden variar la escala de la producción dependiendo del tipo de maquinaria usada para aplicar estas técnicas. La maquinaria puede clasificarse en pórticos, cables suspendidos, enjambre de minirobots y brazos mecánicos. [Labonnote, Rønquist, Manum and Rüter 2016]



a) Pórtico b) Cable suspendido c) Enjambre d) brazo robótico [Lim et al, 2012]

2.3.1 Pórticos

Los pórticos son la representación directa de hacer a gran escala la tecnología *MDF* pero en la construcción, para decirlo de forma sencilla una impresora 3D gigante.

Contour crafting fue el primero en utilizar esta solución en 2001 y al igual que el *3D concrete printing* este tipo de soluciones tienen un cabezal de impresión que se desplaza mediante una máquina *CNC* (*Computer Numeric Control*) por un pórtico que se mueve en cualquier dirección definida en los ejes X, Y e Z.



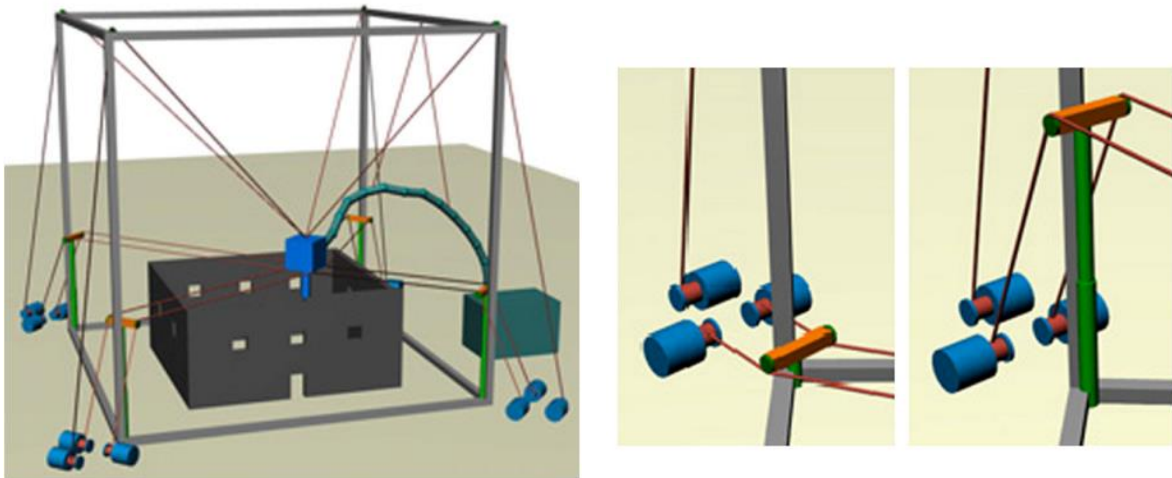
Figura 21: Impresora 3D con sistema de pórtico, in Westerlo, Belgium.

Para el *D-shape* se usa un cabezal de pulverización que se mueve a lo largo de los ejes X y Y, y rocía un líquido de unión sobre áreas predefinidas de la capa de arena. El eje Z está dividido en espacios de 20mm, y la máquina sube un escalón cada vez que se ha completado toda la capa. [Labonnote, Rønnquist, Manum and Rüter 2016]

2.3.2 Cables suspendidos

Como primera aproximación, las coordenadas cartesianas pueden parecer las más apropiadas para la FA. Sin embargo, debido al gran tamaño de los elementos fabricados, trasladar e instalar pórticos requiere un esfuerzo considerable. Aquí reside el mayor beneficio en los sistemas de cables suspendidos, y es el hecho de que proporcionan mayores espacios de trabajo a un menor coste, además de tener más facilidad en el transporte e instalación. [Bosscher, Williams II, Sebastian, Castro-Lacouture, 2007]

Este sistema consiste en un cabezal suspendido por cables a un marco metálico. El cabezal se mueve controlado por motores que mediante CNC, retraen o extienden los cables de forma automatizada para lograr la posición requerida. [Barnett, Gosselin 2015]



Robot construyendo una estructura. Bosscher, Williams, Sebastian, Castro-Lacouture, 2007

La compañía WASP (*World Advanced Saving Project*) propone una solución basada en un robot delta, pero tiene cierta similitud con el sistema de cables suspendidos. En lugar de cables el cabezal se encuentra suspendido por perfiles ligeros, que restringen la rotación. [BigDelta WASP]



Figura 22: Impresora BigDelta 2016

2.3.3 Enjambre

Un sistema muy diferente que rechaza el uso de un único elemento, en favor de un conjunto de minirobos que trabajen en grupo. Esta aproximación ya fue descrita en 1997 por Pegna como “la construcción de una gran estructura por un ejército de hormigas mecánicas, grano a grano”. [J. Pegna 1997]

Este sistema resalta en lugares con difícil accesibilidad o cuyo acceso es peligroso para la mano de obra. [Labonnote, Rønnquist, Manum and Rüter 2016]

El *Institute for Advanced Architecture of Catalonia* (IAAC), desarrolló una familia de tres robots, cada robot vinculado a sensores y un sistema de posicionamiento local. Estos alimentan datos en vivo en un software personalizado que les permite controlar el movimiento de los robots y la deposición del material de salida: mármol artificial de fraguado rápido.

El primer robot, el Robot Base [Figura 23.1], coloca las primeras diez capas de material para crear una base. Colocar el material en una espiral continua tiene la ventaja que permite un flujo de material constante, sin tener que mover la boquilla hacia arriba a intervalos de una capa.

El segundo robot, el Grip Robot [Figura 23.2], se adhiere a la huella de la base. Sus cuatro rodillos se sujetan al borde superior de la estructura permitiéndole moverse a lo largo del material previamente impreso, depositando más capas. La boquilla se mueve

dinámicamente, lo que permite una mayor precisión de la salida del material. Los calentadores, integrados en la estructura del robot, aumentan la temperatura del aire local para influir en el proceso de curado. Controlado por software personalizado, el robot sigue una ruta predefinida.

Finalmente el último robot, el robot de vacío [Figura 23.3]. Mediante un generador de vacío, este robot se adhiere a la superficie de la estructura previamente impresa. Moviéndose libremente sobre la estructura creada, depositando material en la superficie de esta, mejorando sus propiedades estructurales. Esta tarea puede ser realizada por un robot o un enjambre de robots trabajando en coordinación.



Figura 23:1, 2 y 3 Minibuilders del Institute for advanced Architecture of Catalonia

2.3.4 Brazo robóticos

Hay un gran número de soluciones que incluyen el uso de un brazo robótico, desde aplicar por extrusión el material de la estructura, hasta realizar tareas secundarias en el proceso de construcción como aplicar pintura o algún material superficial. [Labonnote, Rønnquist, Manum and Rüter 2016]

En términos generales, los brazos robot tienen la ventaja de tener más movilidad y ser más móviles que los sistemas de pórtico y de poder imprimir con más libertad debido al movimiento de 6 ejes [Figura 21] con el que los sistemas de pórtico tendrían dificultades. Por otro lado, generalmente tienen desventajas de costo y estabilidad, y se ven limitados por el rango de impresión. Por esto destacan más en operaciones "complejas" que requieran elementos individuales con alta complejidad y detalle. [COBOD]

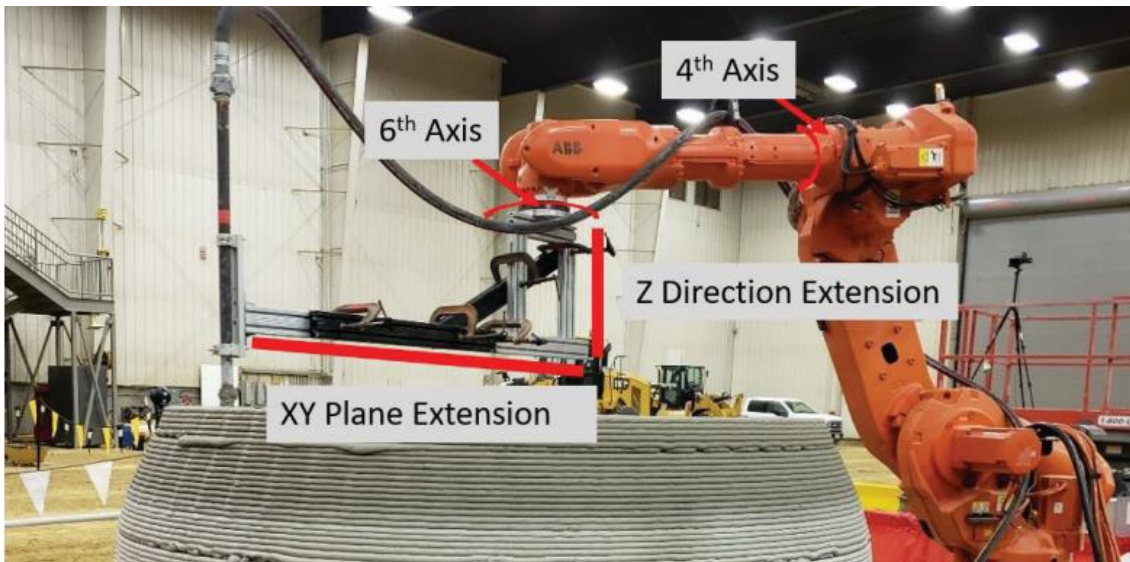


Figura 24: Extensión en un brazo robótico para incrementar el rango de construcción.

2.4 Aportaciones de la FA con hormigón en la arquitectura

Desde el inicio del siglo XX se ha ido desarrollando la automatización en la mayoría de los sectores de producción secundarios o industriales, a excepción de la arquitectura o las estructuras civiles. [Khoshnevis 2004]

Esto se debe a una falta de un sistema adecuado para la automatización de estructuras a gran escala; a diseños convencionales no aptos para la producción en serie, a un número pequeño en la producción de piezas únicas comparado con otras industrias, limitaciones en el material que requieren hacerse in-situ, y debido al precio de la producción automática en relación a la tradicional. Por el otro lado la industria de la construcción está sufriendo los siguientes problemas: [Warszawski, Navon, 1998]

- “La eficiencia laboral es alarmantemente baja.
- La tasa de accidentes en las obras de construcción es elevada.
- La calidad del trabajo es baja.
- El control de la obra es insuficiente.
- La mano de obra calificada está desapareciendo”.

Además, en algunos países hay problemas adicionales como un déficit de viviendas donde el aumento incontrolado de la población es muy superior al ritmo tradicional de construcción de viviendas, ya sea por tener un sector de la construcción pobre e inadecuado o por

políticas de vivienda inefectivas, como es el caso de Nigeria que tiene 24,4 millones de vagabundos [Afolabi, Ojelabi, Bukola, and Akinola 2018].

En las últimas décadas, se ha implementado el *Rapid Prototyping* (un término obsoleto que se usaba inicialmente para la FA, cuando se usaba para hacer maquetas provisionales de objetos que luego serían construidos con el material adecuado [Malé-Alemaný 2015] para el diseño arquitectónico, pero no ha sido hasta la aparición de tecnologías como el Contour Crafting y otras más de FA que ha sido posible automatizar el proceso constructivo a gran escala [Hwang and Khoshnevis].

La fabricación aditiva puede tener un impacto muy positivo respecto a estos problemas mencionados, como indican los análisis de los siguientes estudios [Birtchnell and Hoyle, 2014] [Savonen, 2015] sobre el desarrollo de la FA en países como Nigeria:

Una **reducción del déficit de vivienda**. Nigeria, con una población de 180 millones y creciendo un 5,5% anualmente, tiene un gran déficit de viviendas; además los economistas prevén que se pueden construir unas 100.000 viviendas cada año, una cifra muy inferior a la demanda. La impresión 3D con hormigón puede agilizar mucho este proceso, algunas compañías comerciales ofrecen la construcción automática de una casa en menos de 24h [COBOD], además de ofrecer un precio más económico de unos 10,000\$, a diferencia de los más de 14,500\$ que cuesta con los actuales sistemas “tradicionales” [Afolabi, Ojelabi, Omuh and Tunji-Olayeni, 2019].

Una **reducción de los residuos** en la construcción, se puede observar: desde bambúes utilizados para andamios, encofrados de madera, recortes de armaduras de acero, clavos, alambres, baldosas rotas y restos de hormigón sin usar, en las obras en construcción y vertederos. Es evidente el problema que esto genera, en tan solo 5 años Nigeria ha generado 40m toneladas de desperdicio de las cuales una gran parte son de la construcción [Babatunde 2012].

Un **incremento de la seguridad** en las obras. La industria de la construcción en Nigeria tiene un alto riesgo de incidentes fatales [Idoro, 2007]. Los sistemas de FA permitirían reducirse significativamente la intervención humana necesaria en la obra lo que disminuiría los accidentes en gran medida.

Una **construcción más sostenible**. La FA puede llegar solamente a usar hasta el 40% del total de las materias primas y solo un 30-70% de la energía requerida de lo que hubiera usado un proceso “tradicional” [WinSun website]

Una **reducción en el coste**. Gran parte de la mano de obra es realizada por la maquinaria, que inicialmente tendrá un coste más elevado, pero se amortizara con el tiempo, ya que el mantenimiento es más barato que lo que costaría la mano de obra “tradicional”. A pesar de que hay el miedo de que la FA conlleve una gran pérdida de trabajos, pero estos serán

sustituídos por operarios con nuevos requisitos basados en esta tecnología. [McAlister and Wood, 2014]

Además de aportar soluciones para los problemas en la industria de la construcción también aporta beneficios respecto al diseño arquitectónico y al proceso constructivo. Podemos sintetizar estas ventajas en:

La **Producción en masa**, como se ha mencionado anteriormente esta tecnología tiene el potencial para proporcionar una vivienda asequible, ya que no requiere encofrado, ni mucha mano de obra, sólo se necesita la maquinaria y un mínimo de supervisión para asegurar el correcto funcionamiento. Un caso para destacar su uso, sería la rehabilitación de barrios marginales, los cuales según el método tradicional implicaría desplazar los habitantes por un largo periodo de tiempo.

La **Personalización**, esto da a los arquitectos, la oportunidad de libertad en formas más complejas, sin la necesidad de usar un encofrado u otros tipos de molde, los cuales pueden llegar a requerir de carpinteros especializados.

El **Control de calidad**, al no necesitar encofrado, la fabricación aditiva es siempre visible, lo que permite detectar errores al instante, ofreciendo la oportunidad de arreglarlos sin tener que rehacer una gran cantidad de trabajo, y al ser un proceso mecanizado minimiza el error humano.

La **Velocidad**, es común para muchas compañías que trabajan con fabricación aditiva dejar la maquinaria trabajando durante periodos relativamente largos de tiempo sin supervisión, por lo que es posible dejar preparada la maquinaria para que trabaje ininterrumpidamente por la noche ahorrando mucho tiempo, el cual es imposible con los sistemas tradicionales, haciendo que el único factor limitante sea la velocidad de endurecimiento del material utilizado.

El **Transporte**, la fabricación aditiva tiene mucho potencial en los elementos prefabricados, siendo posible transportar un brazo robótico a un taller/almacén con un entorno controlado, cercano al lugar de la obra, para así facilitar el transporte de todas las piezas prefabricadas. [Baradi 2016]

3. Máquina de impresión 3D

Hay una gran variedad de impresoras 3D en hormigón como hemos podido observar, pero nos centraremos en el funcionamiento de una *3D concrete printing*.

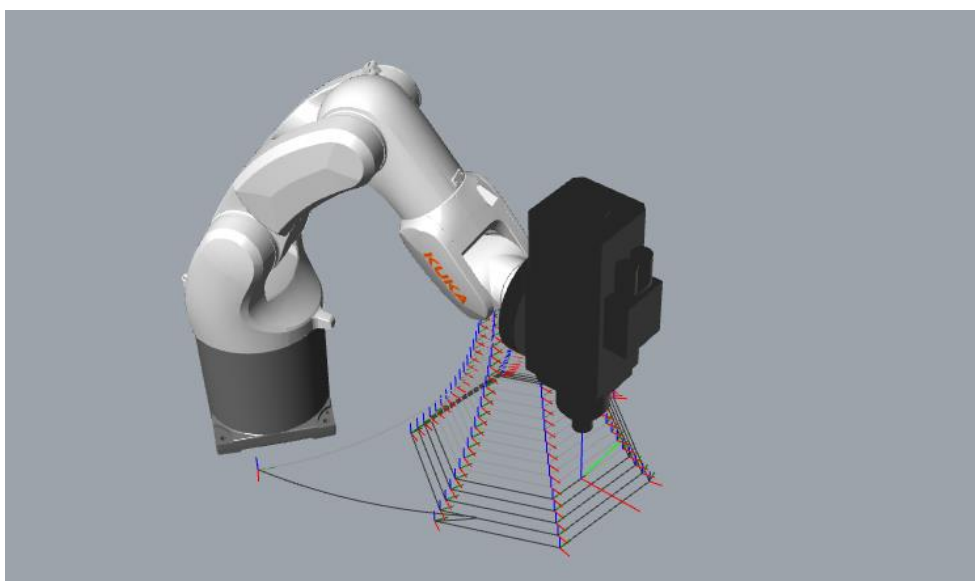
El funcionamiento general consta de 3 pasos: preparación de los datos, elaboración del hormigón y la estructura de suministro.

- **Preparación de datos:** Al igual que en una impresora por modelado por deposición fundida, comienza con un archivo de diseño digital que se crea utilizando herramientas CAD.

Para optimizar este proceso se usan programas como Grasshopper un plug-in de Rhinoeros, ya que puede extraer la información necesaria para enviar a la impresora 3D directamente, sin tener que pasar por programas externos que conviertan el objeto deseado en información que la impresora pueda procesar.

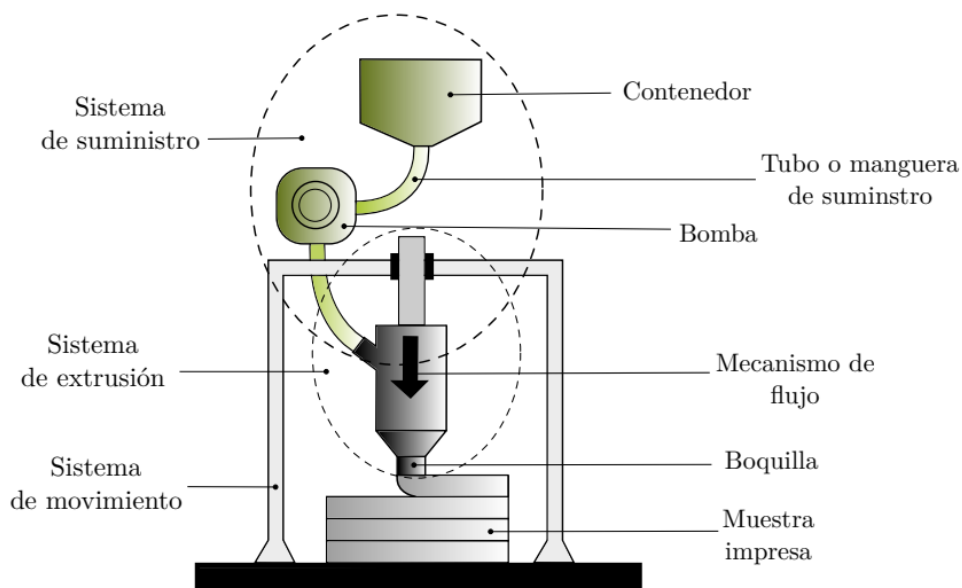
El programa ofrece personalizaciones, el uso de objetos de código abierto, trabajar con intersecciones, crear patrones y elegir la ruta que seguirá la extrusora, entre otras características.

De esta forma, se puede imprimir una pieza o un modelo directamente a través de Grasshopper. Para obtener el *gcode* (el archivo con los comandos que controlan la impresora), se requiere un paso de deconstrucción del modelo en polilíneas, así como puntos con coordenadas X-Y-Z que serán los comandos de la impresora extrusora. Con este sistema, podemos ajustar la impresión y crear, por ejemplo, rebanadas no planas donde las capas tienen diferentes alturas. A diferencia del software de corte tradicional que corta el modelo STL (El formato de archivo STL es el formato de transmisión de datos estándar por excelencia de la industria de creación rápida de prototipos) en capas horizontales iguales, este complemento ofrece la posibilidad de controlar los movimientos de la extrusora de una manera más avanzada. Por lo tanto, el *gcode* se puede desarrollar dentro del programa y se pueden modificar muchos parámetros que normalmente no están disponibles en Rhinoceros. [www.3dnatives.com/en/]



Simulación de brazo robótico imprimiendo un objeto. Elaboración Propia

- **Elaboración del hormigón:** esto implica mezclar los componentes necesarios para ajustar el hormigón a las necesidades del proyecto y las características de la máquina, también influye la velocidad de construcción requerida.
- **Estructura:** Una vez introducida la mezcla del hormigón en el sistema de suministro, este es transportado en tuberías o mangueras al sistema de extrusión utilizando algún método de transporte como una bomba a presión, que extruye el hormigón capa por capa a través de una boquilla, controlado por el sistema de movimiento.



Partes de una impresora 3D con FA utilizando hormigón [Ignacio, 2018]

En la imagen se ven los elementos que componen la totalidad de una máquina de impresión 3D, a continuación se detallarán algunos de los elementos: [Ignacio, 2018]

Sistema de suministro: Abarca desde el almacenamiento de la mezcla hasta las tuberías y mangueras para transportar está a través del elemento que impulsa el material hasta el sistema de extrusión.

Sistema de extrusión: Compuesto por un mecanismo de flujo que se encara de que haya un flujo constante y continuo, y una boquilla que afecta al caudal del material extruido y en algunos casos se pueden integrar paletas para un acabado liso.

Sistema de movimiento: Como hemos visto en la arquitectura para impresoras 3D, hay muchos casos posibles, desde el más general con pórticos que usan el movimiento en coordenadas cartesianas X,Y y Z, hasta movimiento en coordenadas polares etc...

3.1 Requisitos del hormigón para impresión.

La mezcla de hormigón utilizado en este tipo de impresión requiere de unas características especiales, ya que tiene que pasar por la etapa de bombeo extrusión y deposición capa por capa. Estos requisitos serían los siguientes:

Capacidad de bombeo: se define como la característica para ser lo suficientemente fluido como para pasar a través del sistema de bombeo hasta la boquilla de extrusión, y a la vez tiene que ser lo suficientemente consistente para garantizar que las distintas capas depositadas mantengan su forma. [Mechtcherine, Naidu Nerella, Kasten 2014]. Estos parámetros vienen definidos por la distancia de bombeo y el diámetro de la manguera. Una mezcla bombeable debe poseer baja viscosidad plástica y un valor moderado de tensión de rendimiento. “Mientras el hormigón se mueve en las tuberías, se forma una capa de manchado en las paredes y los agregados gruesos que se acumulan hacia el centro de la tubería. Por lo tanto, para una mejor capacidad de bombeo, el material de mezcla debe ser capaz de resistir la segregación bajo presiones de bombeo tan altas.” De esta manera, se requiere que la velocidad de bombeo se ajuste en función del tamaño y forma del componente para imprimir. En lugares donde haya un cambio de dirección brusco en el transporte del material, es necesario controlar la velocidad de bombeo para evitar que se acumule material en esa zona. [Choi, Roussel, Youngjin and Jinkeun. 2013]. Hay estudios que han investigado las presiones óptimas requeridas para el bombeo de hormigón y han sido cuantificadas y definidas con gran detalle. [Feys, Khayat and Khatib, 2016]

Capacidad de extrusión: Es la capacidad del hormigón para pasar a través de la boquilla de contracción sin segregación y producir un filamento continuo.

Edificabilidad: Es la capacidad de una mezcla para ser impresa sucesivamente hasta cierta altura sin ninguna deformación significativa o colapsar.

4. Comparación entre puentes impresos con hormigón

A continuación procederemos a comparar 2 puentes impresos con hormigón que han utilizado el método *3D Concrete printing*. Uno hecho en los Países Bajos en 2017 [Salet, Zeeshan, Ahmed, Freek and Laagland 2018] y el otro caso de estudio es un puente más reciente construido en Baoshan, China el 2019. [Weiguo, Gao, Sun and Wand, 2020].

4.1 Diseño



Figura 25. Puente acabado en Países Bajos en 2017

El primer caso es un puente creado para la renovación de un carril bici existente llamado Lieve Vrouwensteeg en el pueblo de Gemert en los Países Bajos. Cruza un pequeño canal local llamado Peelse Loop. La luz del puente es de 6,5 m y el ancho de 3,5 m. La carga de diseño uniformemente distribuida es $5,0 \text{ kN/m}^2$. Este puente se trató como un experimento de investigación que involucró a la Universidad Tecnológica de Eindhoven. A pesar de que el puente se pudo haber construido de una sola pieza se hizo en varias piezas para luego ensamblarlas y posteriormente unir las mediante tendones postensados, esto se decidió para poder optimizar la sección transversal del puente y beneficiarse de esta manera de la libertad en la forma de la impresión 3D. En este proyecto no se valoró mucho el diseño arquitectónico, a diferencia del otro caso de estudio, ya que el principal objetivo de este proyecto era lograr construir un puente estructuralmente seguro, para demostrar la viabilidad de este sistema.

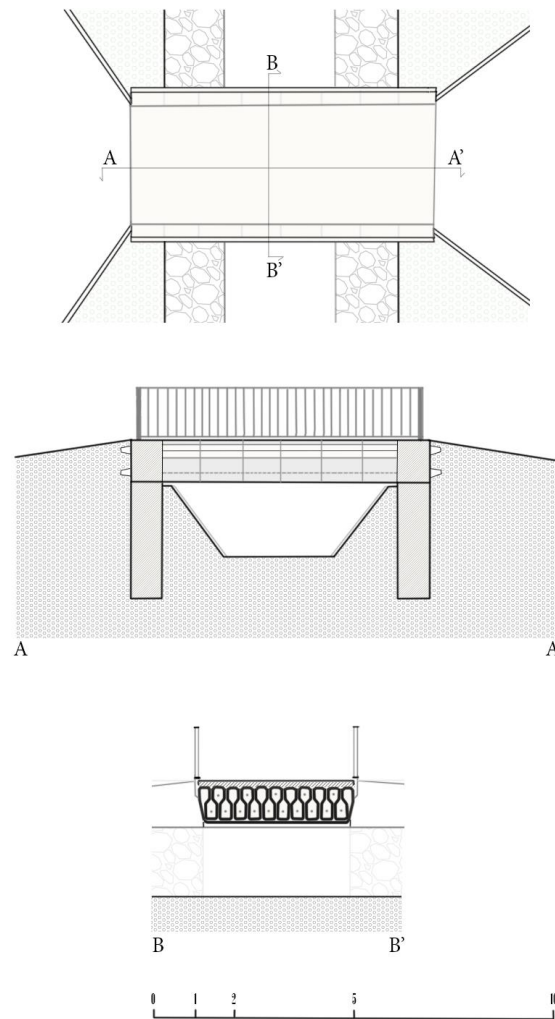


Figura 26. Planos puente Países Bajos. Elaboración Propia

El segundo caso de estudio está ubicado en un parque industrial en el distrito Baoshan de Shanghái, China. Es un puente peatonal de 14,5 m de luz, cuyo el objetivo era demostrar la viabilidad de estructuras de mayor escala respecto a las ya existentes hasta el momento con este sistema. A diferencia del primer caso que utiliza cables pretensados como refuerzo en este caso para optimizar el uso de la técnica se decide utilizar exclusivamente componentes de hormigón impresos en 3D, incluidas unidades estructurales, pasamanos y paneles de cubierta decorativos; el puente está compuesto por 44 unidades de dovelas de hormigón impresas en 3D. Está inspirado en un puente de arco de piedra chino tradicional, el puente Anji en Zhaoxian, China, ya que el hormigón trabaja bien a compresión y no a flexión. Los resultados de la prueba indican que el tamaño completo de la estructura podría soportar

una fuerza de más de 120 kN/m^2 , mucho más resistente que en el primer caso. El arco tiene una pendiente menor al 8% para asegurar la comodidad de los usuarios



Figura 27. Puente acabado en China en 2019

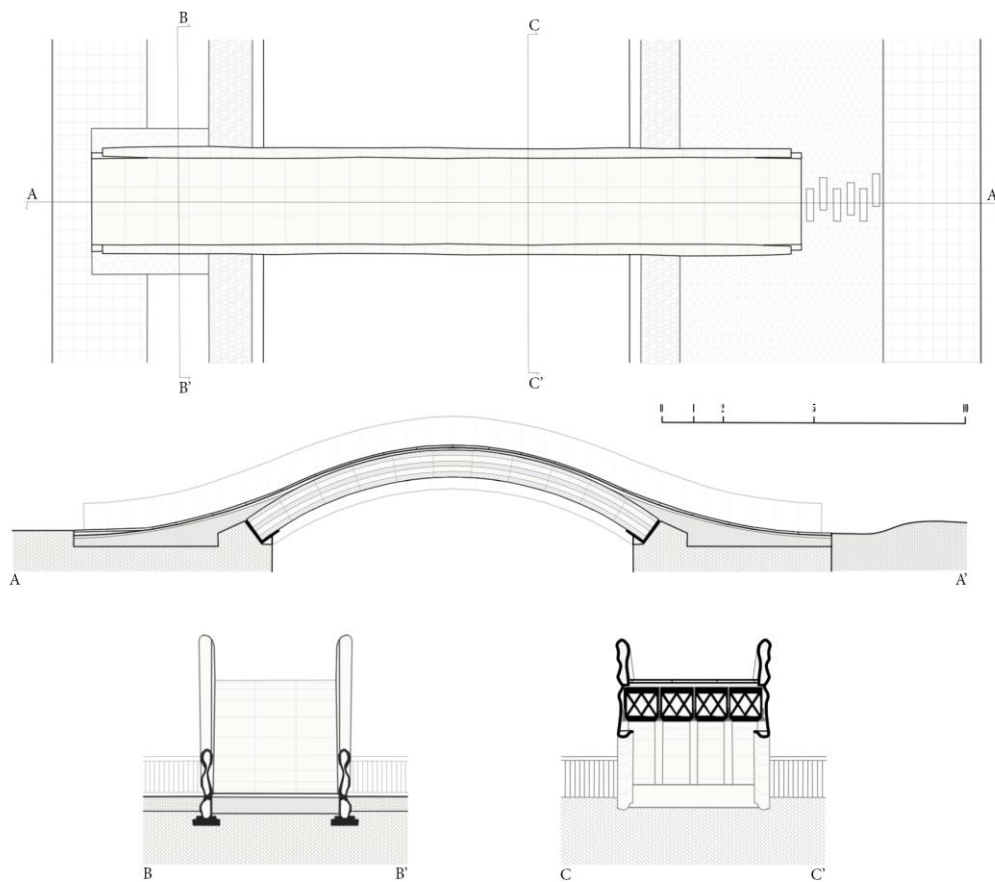


Figura 28. Planos puente China. Elaboración Propia

4.2 Material

En el caso de los Países Bajos, el material usado es Weber 3D 115-1 mortero de impresión, descrito globalmente por [Bos, F., et al. 2016]. Al ser un material hecho a medida que no coincidía con el hormigón estándar (C30/37), se tuvieron que llevar a cabo extensas investigaciones sobre la resistencia y elasticidad de este. [Doomen 2016], [Slager 2017]. El material que Weber desarrolló es una mezcla que se compone de:

- Cemento Portland (CEM I 52,5 R).
- Agregado silíceo con una distribución granulométrica optimizada y un tamaño máximo de partícula de 1 mm.
- Relleno de piedra caliza y aditivos específicos para facilitar el bombeo.
- Modificadores de la reología para la obtención del comportamiento tixotrópico del mortero fresco.
- Una pequeña cantidad de fibras de polipropileno para reducir la formación de grietas debido al secado temprano.
- Agua

Al tener un cable postensado, además de la resistencia también es necesario conocer la rigidez del hormigón ya que el hormigón se acorta bajo la fuerza de pretensado y la cantidad depende de la rigidez de la sección. Estas propiedades se reflejan en la siguiente tabla:

Property	Dir.	Age	Symbol	Value
Density		28 days	P	2,000 kg/m ³
Modulus of elasticity		28 days	E	19,000 MPa
Average compressive strength	u	28 days	$f_{ck,u}$	23.2 MPa
	v	28 days	$f_{ck,v}$	21.5 MPa
	w	28 days	$f_{ck,w}$	21.0 MPa
Average tensile strength (also used for flexural tension)	u	28 days	$f_{ct,u}$	1.9 MPa
	v	28 days	$f_{ct,v}$	1.6 MPa
	w	28 days	$f_{ct,w}$	1.3 MPa
Creep factor ^a		7 days	φ_7	1.0
		14 days	φ_{14}	2.5
		56 days	φ_{56}	3.0
Shrinkage		7 days	ϵ_7	0.6
		14 days	ϵ_{14}	1.2
		56 days	ϵ_{56}	1.5

^aAfter 28 days.

Notes: For the directional dependency, a relative orientation of axis *u*, *v*, *w* is used (Bos et al., 2016), indicating the direction parallel to the print in the horizontal plane, perpendicular to the print direction in the horizontal plane, and vertically perpendicular to the print direction (or parallel to the robot arm), respectively.

Figura 29. Tabla de propiedades del material Weber 3D 115-1

En el caso de China, desarrollaron una composición especial de hormigón reforzado con fibra que puede cumplir con los requisitos. Esta está compuesta por:

- Cemento sulfoaluminoso (SAC).
- Arena con partículas de diámetro 0,2~0,4mm y otra de 0,4~0,7 mm.
- Agua.
- Aditivos que incluyen un retardador, un espesante, un reductor de agua y un agente de resistencia temprana.

Los aditivos se usan para mejorar las características, el espesante y el reductor de agua afectan a la capacidad de extrusión, el reductor aumenta la fluidez para mejorar el transporte en el sistema de bombeo y el reductor aumenta la viscosidad lo que dificulta la extrusión, pero mejora la consistencia una vez depositado. Mientras que el retardador y el agente de resistencia temprana afectan a la edificabilidad, el retardador evita que el hormigón se endurezca dentro del sistema de impresión mientras que el agente de resistencia temprana le da cierta resistencia al hormigón antes de que fragüe para poder formar las capas.

4.3 Sistema de impresión

Para la impresión en el caso de Países Bajos utilizaron la máquina de impresión de la Universidad Tecnológica de Eindhoven. El grupo de investigación opera y desarrolla su propia impresora 3D de hormigón. La impresora consta de un pórtico de cuatro ejes (Los movimientos en X, Y, Z y la rotación en el eje Z) con una zona de impresión de aproximadamente 9,0 x 4,5 x 3 m³, acoplado a una bomba mezcladora de hormigón, ambos controlados por un controlador numérico.

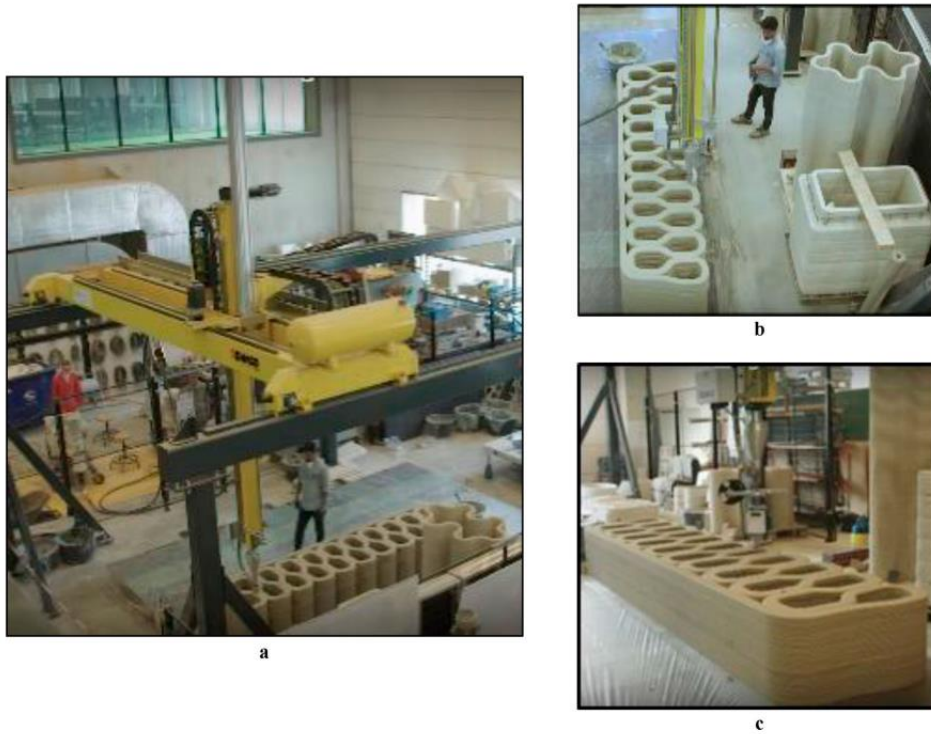


Figura 30. Impresora 3D de la universidad de Eindhoven

Para este proyecto, se tuvo que ajustar la boquilla para incrustar el cable de refuerzo.

“Desarrollaron una boquilla de reflujo (Figura 28), el alambre del cable viene desde el frente y se une al concreto que viene desde la parte superior. El filamento de hormigón con el cable sale de la boquilla por la parte trasera. La boquilla de reflujo permite el arrastre del cable en la capa impresa y no divide la capa en dos.”

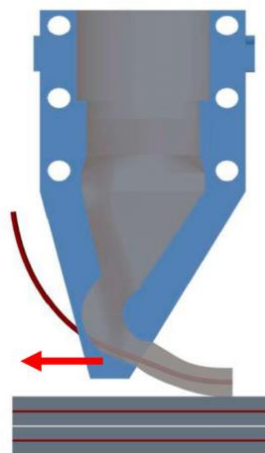


Figura 31. Diseño de la boquilla, con el flujo de hormigón y el cable de refuerzo

En el caso de China utilizaron Grasshopper como programa y un brazo robótico de seis ejes como sistema para la impresión. La ventaja de usar un brazo robótico con este software es que incluye códigos tanto para el movimiento del brazo robótico en todos los ejes, como el control de todo el proceso incluyendo el grosor de la capa y la velocidad de extrusión del cabezal y la bomba integrada. Esto es especialmente útil para formar el principal componente de la estructura que era una pieza en forma de arco, que tenía una inclinación de $6,52^\circ$ y 68 “capas” de hormigón. Además, la velocidad de impresión en los bordes exteriores tenía que ser más lenta para formar un perímetro más grueso. Esto no hubiera sido posible utilizando un sistema de pórtico de 4 ejes como en el primer caso.

En el caso de la boquilla usaron un cabezal de desarrollo propio que incorpora un tornillo sinfín en el interior para evitar que el hormigón se endureciera.

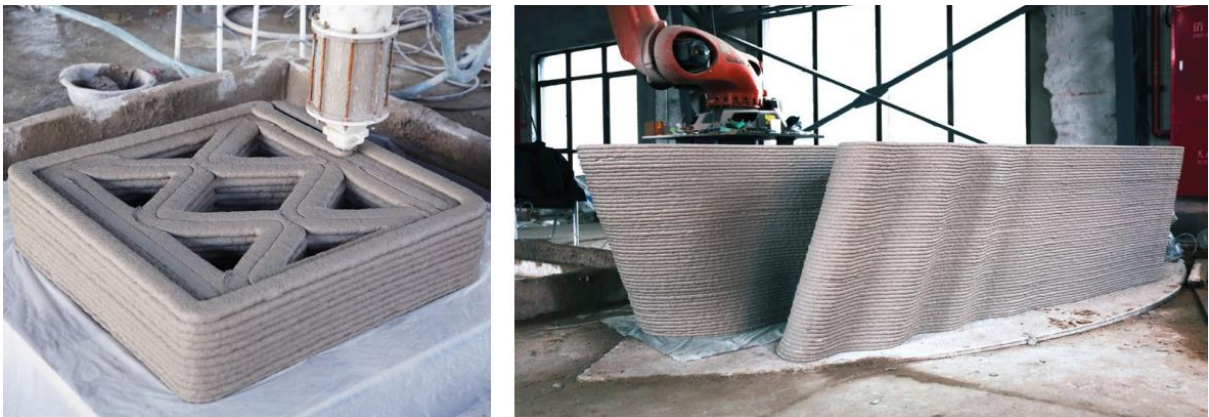


Figura 32. Imprimiendo una de las dovelas que conforman el arco

La mayor parte del proceso fue automatizado, pero debido a la inestabilidad del hormigón utilizado se requirió algo de trabajo manual como el transporte de este hasta la bomba.

4.4 Construcción

En el caso de Países Bajos para juntar las piezas usaron un material de interfaz sintético a base de epoxi en la sección transversal como material de unión para tener una unión homogénea y evitar tensiones en un solo punto al pretensar. Como se puede ver en la imagen [Figura 33], esto se hizo en la obra.



Figura 33 Pretensando el puente en la obra

Para el caso de China además de las 44 dovelas que conforman el arco se imprimieron 68 componentes para el pasamanos y 64 paneles que conforman el pavimento. Para imprimir el arco fueron necesarias 200 horas mientras que para el resto de los componentes necesitaron otras 250 horas.

Para la construcción del arco se instalaron 4 arcos temporales de acero, para soportar las dovelas hasta completar el arco y que fuera autoportante. “Se instala un sistema de monitoreo en tiempo real con sensores de tensión de cuerda vibrante y un monitor de deformación de alta precisión para recopilar datos de fuerza y deformación del puente en tiempo real.”

Si lo comparamos con un puente similar construido de manera “convencional” se redujo 1/3 el precio total principalmente debido a que no se necesitaron refuerzos, lo que redujo considerablemente el costo.



Figura 34. Construyendo el arco, se pueden observar las vigas temporales de acero.

4.5 Conclusiones

El primer caso fue el primero en su tipo no sólo por postensar elementos 3D imprimidos en hormigón sino por el uso de refuerzo de cable en filamento de impresión. Y fue más un experimento que un proyecto, para demostrar los beneficios de este sistema. Se enfocaron más en demostrar que el sistema era seguro y viable, como se puede observar por su falta de diseño arquitectónico y con un tamaño relativamente pequeño.

En comparación al segundo caso, construido 2 años más tarde, el cual ha tenido más referentes que le han ayudado a mejorar el proceso, no sólo imprimiendo la estructura sino la totalidad del proyecto, y demuestra que es posible una ventaja económica y de tiempo respecto al sistema tradicional. Eliminando todos los elementos de refuerzo para poder reducir costos y tiempo, esto le da una ventaja sustancial, pero a costa de que todos los elementos trabajen a compresión, cosa que no es adaptable a muchas construcciones. Pero marca un hecho, que el *3D concrete printing* está avanzando rápidamente y cada vez hay más construcciones en las que se puede sacar beneficio utilizando este sistema.

5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se ofrece una visión de lo que es la FA, explicando sus principios, su adaptación a la construcción actual y sus principales ventajas. Con ello se llega a las siguientes conclusiones:

- La FA con hormigón en la construcción está todavía en una fase de desarrollo con margen para mejorar.
- El desarrollo de esta clase de arquitectura conlleva beneficios económicos y de optimización al automatizar el proceso de construcción, estos vienen principalmente en la reducción de mano de obra necesaria y la rapidez en comparación al sistema “tradicional”.
- Donde se observa un mayor beneficio en usar esta técnica es en crear elementos únicos o series cortas de objetos. Como puede ser en la restauración de edificios.
- Las construcciones realizadas con FA en hormigón in-situ, todavía están limitadas a viviendas de un máximo de 2 plantas de altura. Es posible superar esta limitación si se utiliza la FA para producir componentes prefabricados para luego montarlos en la obra.
- Como se puede observar en la comparación de los puentes, las obras que utilizan actualmente FA tienen una gran variedad de posibilidades, desde combinar la FA incorporando directamente elementos de refuerzo hasta utilizarla exclusivamente para producir la totalidad de los elementos requeridos para la obra.
- Aunque en este trabajo nos hemos centrado principalmente en la fabricación aditiva en hormigón, la FA puede ser utilizada en una gran variedad de materiales, alguno de los cuales tienen una mayor libertad en las limitaciones del proceso como puede ser el caso del acero.

6. Bibliografía:

1. Juan Rey Rey. (2013). La barrera del análisis estructural y la representación gráfica en el desarrollo de los proyectos arquitectónicos: el caso de la Ópera de Sídney.
2. Benjamin, Nam, Fereydoon & Ali. (2021). Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison
3. Stephen, Zicheng, Vimal & Alborz. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies
4. Marta Malé-Alemany. (2015). El potencial de la fabricación aditiva en la arquitectura: Hacia un nuevo paradigma para el diseño y la construcción.
5. J. Pegna. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction
6. Lim S, Buswell R A, Le T T, et al. 2012 Developments in construction scale additive manufacturing processes.
7. Ma GuoWei, Wand Li & Ju Yang (2018) State of the art of 3D printing technology of cementitious material An emerging technique for construction
8. Rudenko A. 2015. 3D concrete house printer <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html>
9. Sandra Amado Soriano. (2019). Diseño de una impresora 3D para la construcción de viviendas.
10. Jordi Soler Solà. (2013). 'Form finding' y fabricación digital en hormigón armado
11. <https://d-shape.com/Prodotti/unacasatuttadiunpezzo/>
12. Behrokh Khoshnevis. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies
13. A. Warszawski, R. Navon. (1998) Implementation of robotics in buildings: current status and future prospects, Journal of Construction Engineering and Management
14. Afolabi A O Ojelabi R A Bukola A Akinola A Afolabi A. 2018. Statistical exploration of dataset examining key indicators influencing housing and urban infrastructure investments in megacitiesData in Brief18 pp 1725-1733
15. Dooil Hwang and Behrokh Khoshnevis. Concrete wall fabrication by contour crafting

16. Birtchnell T and Hoyle W. 2014. 3D Printing for Development in the Global South: The 3D4D Challenge
17. Savonen B L. 2015. Criteria for sustainable product design with 3D printing in the developing world
Unpublished Master's report Michigan Technological University.
<http://digitalcommons.mtu.edu/etds/926>
18. COBOD. (2021) COBOD - Modular 3D construction printers - 3D printed buildings. COBOD. from
<https://cobod.com>
19. AO Afolabi , RA Ojelabi , IO Omuh and PF Tunji-Olayeni, 2019, 3D House Printing: A sustainable housing solution for Nigeria's housing needs
20. Babatunde S O. 2012. Quantitative assessment of construction materials wastage in the Nigerian construction sites *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences* 3 pp 238-241
21. Idoro G I. 2007. A comparative evaluation of health and safety performance of indigenous and multinational construction research journal. *J. of the Dept. of Building, University of Lagos* 1 pp 65 – 75
22. Russell P. 2015. 3-D Printed Earthen Architecture A Sustainable Housing Solution for Displaced Populations Unpublished Master of Science in Product Design Innovation, Aston University
23. Yingchuang Shanghai (WinSun) 3D House Printing Official Introduction, Yingchuang Building Technique (Shanghai) 2018 (winsun3d.com)
24. McAlister C and Wood J. 2014. The potential of 3D printing to reduce the environmental impacts of production *ECEEE Industrial Summer Study Procs* pp 213 – 221.
25. R.A. Buswell , R.C. Soar, A.G.F. Gibb, A. Thorpe 2006 *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*
26. Nathalie Labonnote, Anders Rønquist, Bendik Manum, Petra Rüter. 2016. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities
27. Eric Barnett, Clément Gosselin. 2015. Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot
28. Paul Bosscher, Robert L. Williams II, L. Sebastian Bryson, Daniel Castro-Lacouture. 2007. Cable-suspended robotic contour crafting system
29. World's Advanced Saving Project, BigDelta WASP experiments new materials in Barcelona, 2015. Accessed: November 2015, Available from <http://www.wasproject.it/w/en/bigdelta-wasp-experiments-new-materials-at-construmat-inbarcelona/> <https://iaac.net/project/minibuilders/>

30. Miriam Campillo Mejías. 2017. Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón
31. Jeju, South Korea. 2004. Hwang Dooil, Khoshnevis Behrokh, Concrete wall fabrication by contour crafting, Paper Presented at the 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004).
32. Hugo Ignacio Reyes Jofré. 2018. Estudio de las Características del hormigón para su uso en una máquina de impresión: selección de propiedades, ensayos experimentales y diseño de mezcla.
33. Viktor Mechtcherine , Venkatesh Naidu Nerella, Knut Kasten. 2014. Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer
34. Chao Zhang , Venkatesh Naidu Nerella, Anurag Krishna, Shen Wang, Yamei Zhang, Viktor Mechtcherine, Nemkumar Banthia. 2021. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review
35. Myoungsung Choi, Nicolas Roussel, Youngjin Kim, Jinkeun Kim. 2013. Lubrication layer properties during concrete pumping
36. Dimitri Feys, Kamal H. Khayat, Rami Khatib. 2016. How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?
37. Theo A. M. Salet, Zeeshan Y. Ahmed, Freek P. Bos & Hans L. M. Laagland 2018. Design of a 3D printed concrete bridge by testing
38. Weiguo xu, Yuan Gao, Chenwei Sun and Zhi Wang. 2020. Fabrication and application of 3D-printed concrete structural components in the baoshan pedestrian bridge project.
39. Bos, F., et al., 2016. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing.
40. Doomen, C.C.M., 2016. The effect of layered manufacturing on the strength properties of printable concrete. Graduation Thesis. Eindhoven: TU/e.
41. Slager, G.J., 2017. Influence of the Interface between Layers on the Tensile Properties of 3D-Printed Concrete. Graduation Thesis A-2017.194. Eindhoven: TU/e.
42. Kaninik Baradi. 2016. 3D Printing as a Construction Process for Structural Members

Lista de ilustraciones

Figura 1. Fuente: http://www.platbloggen.se/?page_id=261

Figura 2. Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/kunsthau-de-graz/>

Figura 3. Fuente: <https://barriopixel.wordpress.com/2008/08/06/la-fiebre-de-los-juegos-olimpicos-el-nido-del-ave-the-bird-nest/>

Figura 4. Fuente: <https://www.kimya.fr/en/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/>

Figura 5. Fuente: <http://www.metalfabril.com.ar/servicios-plegado-de-chapas.html>

Figura 6. Fuente: <http://www.tallerestarema.com/curvado-de-tubo/>

Figura 7. Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/134193263871406486/>

Figura 8. Fuente: <https://egyptologynewsnetwork.blogspot.com/2010/08/tutankhamuns-mummy-materialises-secret.html>

Figura 9. Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/top-10-impresoras-low-cost-27072016/>

Figura 10. Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/320529698457142228/>

Figura 11,12. Fuente: DB. Khoshnevis, S. Bukkapatnam, K. Kwon, J. Saito. 2001
“Experimental investigation of Contour Crafting using ceramic materials, Rapid Prototyping Journal

Figura 13. Fuente: <https://www.eadic.com/contour-crafting/>

Figura 14. Fuente: <https://makeagif.com/gif/why-design-now-contour-crafting-ar1Sp4>

Figura 15. Fuente: <https://www.dificonsa.com/empresa-china-construye-10-casas-24-horas-impresion-3d/>

Figura 16. Fuente: <https://www.neoteo.com/d-shape-una-enorme-impresora-3d/>

Figura 17. Fuente: <https://3dprint.com/12034/3d-printed-house-pool-ny/>

Figure 18. Fuente: <https://3dprint.com/266510/university-california-thesis-reviewing-3d-printing-construction-including-mars/>

Figura 19. Fuente: <https://actualidad.rt.com/actualidad/208283-dubai-imprime-3d-oficina-futuristica>

Figura 20. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/867202/esta-compleja-columna-de-hormigon-se-construyo-con-encofrados-impresos-en-3d>

Figura 21. Fuente: <https://mmcmag.co.uk/3d-a-two-storey-house-in-two-days/>

Figura 22. Fuente: <https://imprimetresde.com/la-impresora-3d-mas-grande-del-mundo-12-metros-de-altura/>

Figura 23. Fuente: <https://iaac.net/project/minibuilders/>

Figura 24 Fuente: N. D. Watson , N. A. Meisel , S. G. Bilén , J. Duarte , and S. Nazarian. Large-scale additive manufacturing of concrete using a 6-axis robotic arm for autonomus habitat construction.

Figura 25, 29, 30, 31, 33: Design of a 3D printed concrete bridge by testing Theo A. M. Salet, Zeeshan Y. Ahmed, Freek P. Bos & Hans L. M. Laagland 2018

Figura 27, 32, 34: Weiguo xu, Yuan Gao, Chenwei Sun and Zhi Wang. 2020. Fabrication and application of 3D-printed concrete structural components in the baoshan pedestrian bridge project.