INVESTIGACION DE TECNICAS DE FABRICACION AUTOMATIZADAS PARA EL SECTOR DE CONSTRUCCIÓN "FACONS"

Entregable: Resumen de tareas realizadas.

Número de proyecto: 22200061 Expediente: IMDEEA/2022/62 Duración: Del 01/06/2022 al 31/10/2023 Coordinado en AIDIMME por: Luis Marín Mateos Aparicio



### ÍNDICE

A. OBJE	TIVO DEL ENTREGABLE	1
B. ACTI	VIDADES REALIZADAS	2
PT4- IN	TEGRACIÓN DE DISPOSITIVO HIBRIDO DE IMPRESIÓN 3D Y ROBÓTICA	2
4.1 4.2 4.3	ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA HIBRIDO INTEGRADO INFORME DEL DESARROLLO ELECTROMECÁNICO INFORME DEL DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y LA INTERFAZ DE COMUNICACIONES	2 6 18
PT5- AN	NALISIS DE PROCESOS INTEGRADOS DE IMPRESIÓN Y ELEMENTOS DE ACABADO	33
5.1 5.2	INFORME DE APLICACIONES DEL SISTEMA HIBRIDO Y PARÁMETROS DE PROCESO ASOCIADOS INFORME DE LA MEJORA DE ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES	33 46
PT6- RE	ALIZACIÓN DE PRUEBAS EN PILOTO DEMOSTRATIVO	53
6.1	INFORME DE PRUEBAS REALIZADAS. DISEÑO DEL DEMOSTRADOR, PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA Y RESULTADOS OBTENIDOS	53









### A. Objetivo del entregable

Este entregable recopila el desarrollo realizado dentro de todos los paquetes de trabajo del proyecto FACONS.

El objetivo del proyecto consistía en la integración de un brazo robotizado en un sistema automatizado tridimensional para la construcción de elementos estructurales mediante fabricación aditiva. Este brazo robotizado complementaría la aplicación del material que realiza la estructura tridimensional, insertando elementos necesarios para su comportamiento estructural.

Dentro de esta integración se pretende desarrollar el sistema de control del proceso híbrido, proceso compuesto por dos sistemas automatizados (estructura y brazo) con controladores diferentes, que deben coordinarse para desarrollar secuencias de trabajo complejas y complementarias.

Se ha investigado la viabilidad de compatibilizar determinadas operaciones en ambos sistemas pueden desarrollar por separado, pero cuyas interacciones puedan resultar incompatibles.





INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL





#### **B. Actividades realizadas**

#### PT4- INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVO HIBRIDO DE IMPRESIÓN 3D Y ROBÓTICA.

#### 4.1 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA HIBRIDO INTEGRADO

En primer lugar se han estudiado las características tanto electromecánicas como de control de:

- Sistema de construcción 3D
- Sistema robótico
- Herramienta de agarre

Posteriormente, se han analizado las limitaciones de cada uno de ellos y establecido las capacidades del sistema integrado a potenciar en forma de especificaciones técnicas necesarias para las tareas de desarrollo de la integración electromecánica y del sistema de control e interfaz.

#### SISTEMA CONSTRUCCIÓN 3D.

El dispositivo de fabricación aditiva SMART de la empresa BE MORE 3D, es una tecnología de construcción 3D a una escala de laboratorio por lo cual su electrónica está diseñada para ser modificada y poder ser integrada con diversos sistemas externos.



Figura 1: Dispositivo de fabricación aditiva SMART

En el entregable se analiza el sistema electromecánico de la maquina y el hardware de control así como el software de control.



DIFUSIÓN







SISTEMA ROBÓTICO

2023

ENTREGABLE



Figura 2: Robot ABB IRB 1200-5/0.9

Dentro de la gama de robots IRB 1200 se ha seleccionado la versión IRB 1200-5/0.9 que tiene las siguientes características:

- Alcance de 901mm
- Capacidad de carga 5 kg
- Carga en el brazo de 0.3Kg.
- Repetitividad de posicionamiento 0.025 mm.
- Dimensiones de 210 x 210 mm.
- Peso de 54Kg.
- Suministro eléctrico 200-600 V, 50-60 HZ.
- Ratio de transformación 4.5 KVA
- Consumo 0.38 KW.
- Montaje en cualquier ángulo.
- Grado de protección IP 64.

#### HERRAMIENTA DE AGARRE

Para la colocación de los diferentes elementos estructurales durante la fabricación, se contempla inicialmente dos tecnologías distintas que se pueden adaptar a los tipos de armaduras que se utilizan en la construcción. Se trata de dos herramientas de agarre del fabricante OnRobot, la primera es una pinza paralela y la segunda es una pinza electromagnética. Esta segunda herramienta se ha considerado adecuada por la naturaleza férrica de las armaduras empleadas como refuerzos estructurales en la fabricación 3D.

En la siguiente tabla se muestran las principales características de ambas herramientas de forma comparativa.









	2FG7	MG10
Modelo		J.obot
Carga [Kg]		2.8 kg ↓ 2.8
Carrera [mm]	Externa 1-39 35-73 Interna 11-49 45-83	
Fuerza [N]	20 – 140	300
Velocidad	16 – 450 [mm/s]	300 [ms]
IP	IP67	IP67
Dimensiones [mm]	144 x 90 x 71	71 x 80.2
Peso [Kg]	1.1	0.8

Tabla 1: Descripción electromecánica pinzas OnRobot.

Estas herramientas han sido seleccionadas debido a que su grado de protección IP era el más alto de entre las disponibles del mercado y por el entorno con condiciones "agresivas" en el que van a tener que trabajar.

El control de estas herramientas y la comunicación con otros sistemas se puede realizar por medio de un dispositivo denominado "Compute Box". La función de este dispositivo es servir como interfaz para el usuario, mediante la que pueda transmitir datos de sensores o el estado de una herramienta (por ejemplo, que fuerza o torsión está ejerciendo), así como ordenar a la herramienta que realice una determina apertura con una fuerza indicada cuando reciba una señal proveniente del controlador del robot o de cualquier dispositivo externo.









### VIABILIDAD DE LA INTEGRACIÓN DEL DISPOSITIVO HIBRIDO DE IMPRESIÓN 3D Y ROBÓTICA

Estudiadas las principales características de cada uno de los componentes que se deben incorporar e integrar en el proyecto, se identifica que la viabilidad para la integración del sistema de fabricación con un sistema robótico es posible.

Para esta integración se deberán tomar en cuenta las siguientes necesidades de diseño y desarrollo:

- Diseñar un carro en el que se pueda acoplar el brazo robótico para integrarlo junto al del cabezal de impresión y de esta forma los dos mecanismos se puedan mover de forma solidaria, tomando en cuenta el desplazamiento que tendrá el centro del robot respecto al centro de la boquilla.
- Diseñar un soporte en el sistema de impresión para sujetar el controlador del robot y que como en el caso anterior se pueda mover de forma solidaria al sistema.
- Para la comunicación entre la herramienta, robot y cuadro de mando de la máquina de fabricación aditiva será necesario diseñar un cuadro electrónico auxiliar a modo de pasarela de datos en el cual se adecuen los voltajes de entradas y salidas de cada uno de los dispositivos.
- Para garantizar que todos los dispositivos trabajen como un solo conjunto será necesario que compartan sus sistemas de seguridad, para esto se deberán interconectar sus setas de emergencia.
- Debido a que el entorno en el que se va a trabajar con estos dispositivos tendrá partículas de polvo en suspensión y posibles salpicaduras de mezcla de hormigón, se debe de aumentar la protección IP del brazo robótico instalando una funda de protección al brazo.
- Una vez seleccionadas los elementos estructurales con los que se van a trabajar, será necesario diseñar unos dedos que se acoplen a la herramienta para poder recoger estos elementos de la cuna y colocarlos en el punto de impresión programado.

Entre las limitaciones que se han podido detectar se encuentran:

• Existe un desplazamiento entre el cabezal de impresión y el brazo robótico, este punto es de suma importancia al momento de realizar los movimientos del robot para no colisionar con la tolva o la boquilla y los desplazamientos de la máquina para ir de un punto a otro.











- Por consecuencia del punto anterior el área de impresión se verá afectada en el eje que se instale el robot, y probablemente los puntos al que el robot tenga alcance para posicionar las armaduras sean limitados.
- El desplazamiento anterior también limitará el posicionamiento de la cuna a utilizar en la recogida de los elementos estructurales.
- Como el sistema de fabricación 3D no dispone de un protocolo de comunicaciones al contrario del robot que dispone de Profinet, la única alternativa viable es la comunicación por entradas y salidas de ambos sistemas, lo cual acota la cantidad de datos o instrucciones que se puedan enviar y recibir por parte del sistema de fabricación 3D.
- Las herramientas previamente seleccionadas tampoco disponen de un protocolo de comunicación que pueda compartir directamente con el controlador del robot, por lo cual se utilizara el dispositivo denominado "Control Box" para su comunicación por entradas y salidas digitales limitando el número de señales que se pueden utilizar para comunicar los dos dispositivos. Estas herramientas se tomaron en cuenta por su grado de protección IP.
- Dado que para poder dotar de un mayor grado de protección IP será necesario añadir una funda de protección al brazo robótico, probablemente traerá como consecuencia una reducción en los movimientos del pueda ejercer el robot y por consiguiente las zonas a las que tenga acceso.

### 4.2 INFORME DEL DESARROLLO ELECTROMECÁNICO

DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA AUXILIAR PARA DETERMINAR EL POSICIONAMIENTO DEL ROBOT EN EL SISTEMA DE FABRICACIÓN 3D.

El sistema de fabricación SMART disponible, contiene un elemento estructural que permite suspender sobre él, el carro que sostiene el cabezal de impresión. Este elemento estructural, que compone el eje "X" del sistema de fabricación, permite que se desplace longitudinalmente sobre él el cabezal de impresión a través de un sistema de trasmisión de correa y poleas dentadas. Este eje "X" va sujetado a su vez por sus dos extremos por unos carros de guiado, que le permiten desplazarse con respecto a la vertical, a través de unas columnas de elevación que van sincronizadas a través de dos servomotores y sus correspondientes husillos y tuercas.





INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESAR



DIFUSIÓN —



Figura 3: Imagen en perspectiva del elemento estructural eje "X" (sin los carros de guiado laterales) del sistema de fabricación 3D

El cabezal de impresión se desplaza a lo largo de este eje "X", permitiéndole alcanzar cualquier punto definido dentro del espacio de trabajo del sistema de fabricación 3D. El espacio de trabajo o volumen máximo de impresión está determinado por el fabricante en (B x H x L); 2,5 metros X 2 metros X 2 metros; este último valor de Longitud podría ser ampliable a 6 metros, suplementando las guías para obtener la longitud deseada.

De igual manera, se valora la posibilidad de integrar el cabezal del brazo robot en este eje "X", para que pueda desplazarse dentro del espacio de trabajo, definido por los diferentes sistemas de desplazamiento integrados en el sistema de fabricación 3D. Las características del robot permiten su instalación en cualquier ángulo. Por lo tanto, se valora las opciones de ubicar el robot tanto en posición boca abajo, como de manera lateral.

Para definir el posicionamiento del robot hay que conocer las dimensiones y el alcance del mismo, para poder ver las limitaciones que tiene y como realizar la integración del mismo dentro del sistema de fabricación 3D. A continuación se muestra el diagrama del alcance del robot desde una vista lateral y superior:



Figura 4: Diagrama vista lateral robot IRB 1200









Para determinar la posición del robot en el sistema de fabricación 3D, se ha de analizar cuál puede ser la mejor posición del brazo robot con respecto al proceso de fabricación y los elementos constructivos disponibles.

Para ello se definió una estructura auxiliar preliminar donde poder realizar esos análisis previos, sin tener que depender de sistema de fabricación 3D disponible, y así poder evaluar que planteamiento podía ser más interesante a la hora de definir el anclaje del brazo robot al eje "X". Además de permitir a los técnicos de programación estudiar y planificar las trayectorias más óptimas para manipular los elementos seleccionados teniendo en cuenta todas las variables definidas en el proceso.

La estructura que se definió, se diseñó siguiendo parámetros de simplicidad de elementos, sencillez a la hora de realizar la unión entre elementos estructurales y robustez y rigidez estructural, de tal manera que permitiera posicionar el brazo robot en las posiciones definidas previamente y tuviese un comportamiento adecuado.

A continuación se muestra en imágenes la estructura auxiliar diseñada, en sus dos variantes de montaje.



Figura 5: Imagen de la vista en perspectiva de la estructura auxiliar ensamblada para el montaje boca abajo y lateral del brazo robot

Para el adecuado dimensionamiento de la estructura utilizamos los diagramas de alcance del robot para poder verificar que el alcance era el adecuado. A continuación se muestra una imagen con los diagramas sobre los elementos en CAD 3D.











Figura 6: Vista frontal con el diagrama del brazo robot montado boca abajo en el modelo de la estructura y fotografía de la estructura auxiliar con el brazo robot montado boca abajo.

Tras las pruebas realizadas por los técnicos, para determinar tanto la mejor posición del robot como las trayectorias más óptimas para manipular los elementos seleccionados, se decidió que la posición que más flexibilidad y libertad de movimientos tenía para la aplicación que se pretendía desarrollar, es la que sitúa el brazo robot en la posición boca abajo. Ya que permite un rango y un área de movimiento mucho mayor, y permite mayor flexibilidad a la hora de realizar los movimientos del brazo robot, y no condiciona tanto la posición del mismo como en su posición en el lateral.

### DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS GARRAS PARA MANIPULACIÓN DE ELEMENTOS

Como desarrollo de soluciones para la automatización de procesos, se han mantenido diversas conversaciones con las empresas colaboradoras, y se ha determinado que uno de los puntos que actualmente les genera mayor inversión de tiempo, es el de colocación de los elementos de armadura metálica para refuerzo estructural. Como elementos representativos se han seleccionado dos tipos de armaduras, unas que trabajan a nivel horizontal, permitiendo la unión de diferentes paredes o muros, y otras que trabajan a nivel vertical, permitiendo la unión de diferentes capas en las paredes o muros fabricados.

Ambos tipos de armadura están fabricadas con varillas de acero corrugado de diferentes diámetros de sección, para las pruebas realizadas se ha seleccionado las de diámetro 8 mm.

Para la manipulación de este tipo de elementos se han valorado dos tipos de garras











diferentes, una que tiene un mecanismo de dos dedos que abren y cierran para coger y soltar el elemento. Y otra garra que tiene un electroimán que actúa cuando recibe tensión, y al utilizar elementos fabricados en acero permite realizar la misma acción de coger y soltar.

Tras unos primeros análisis de valoración, sobre qué tipo de garra podría resultar más conveniente para la manipulación de nuestros elementos, se determinó que la garra con dos dedos podría permitir una sujeción más fiable a la hora de manipular elementos cilíndricos como son este tipo de varillas.

Para la manipulación de las barras corrugadas mediante la garra de dos dedos, fue necesario diseñar unos dedos específicos, que permitiesen asegurar que al realizar el agarre de los elementos no se moviesen a lo largo del proceso de manipulación, ya que tienen posiciones de colocación determinadas.

Tras probar una primera versión se vio que el agarre no era suficientemete firme y estable. Por esos motivos se planteó un segundo diseño, en el que se acercaron más la posición de los dedos entre sí, para realizar un cierre más fiable, y se les añadió un tercer apéndice, a los dos existentes en cada uno de los dedos, para obtener una mayor estabilidad a la hora de agarrar la varilla.



Figura 7: Imagen del CAD 3D de la segunda versión de dedos diseñados agarrando una varilla corrugada y fotografía de la segunda versión de dedos manipulando una varilla.

Se hicieron pruebas con esta segunda versión de dedos y se notó una importante mejoría tanto en la firmeza como en la estabilidad requerida para la sujeción de la varilla. De hecho, la estabilidad añadiendo este tercer apéndice ya se consideró suficiente para la aplicación. Pero, cuando cerraba por completo la garra, se producía cierta deformación en los dedos, que no permitía aprovechar la fuerza de agarre de la garra en su posición más cerrada, unido a las holguras del mecanismo de transmisión interno, generaba ciertas dudas en que el comportamiento fuese a ser el adecuado.





INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARI



Por lo que se planteó un tercer diseño, en el que se reforzaron los dedos dotándoles de un nervado posterior, para dotarles de mayor rigidez y así evitar esa deformación que se producía.



Figura 8: Imagen del CAD 3D de la tercera versión de dedos diseñados agarrando una varilla y fotografía de la tercera versión de dedos manipulando una varilla.

### DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS SOLUCIONES ESTRUCTURALES PARA LA INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE BRAZO ROBOT EN EL SISTEMA DE FABRICACIÓN 3D

Tras los estudios realizados con la estructura auxiliar, se determinó que la mejor posición del brazo robot era boca abajo. Así que se ha desarrollado un carro que va a trabajar solidario al carro existente, que sujeta el cabezal de impresión, y se va a integrar a él para que los dos sistemas se puedan desplazar a lo largo del eje "X" de forma solidaria.

El planteamiento seguido para poder integrar el carro de sujeción del brazo robot, ha sido el de respetar el actual funcionamiento de la máquina, pero al realizar la integración de los nuevos elementos se han tenido que modificar ciertos parámetros, como por ejemplo el rango efectivo del espacio de trabajo.

Se definieron una serie de elementos que, debían incorporarse en este carro de sujeción del brazo robot, para poder ser operativo junto con el carro del cabezal de impresión. Se definieron unas placas que conformaron la estructura exterior, que necesitábamos que tuviese la rigidez suficiente para poder anclar tanto los sistemas de guiado, como la base del brazo robot, así como los elementos de unión con el carro del cabezal de impresión.











Figura 9: Imagen en perspectiva del modelo CAD 3D del carro con el sistema interno de guiado y los tirantes de unión del carro del brazo robot



sistema de fabricación 3D

DIFUSIÓN —









Para el adecuado dimensionamiento del carro, y para determinar el equilibrio entre ligereza y resistencia requerida para la sustentación del robot, se han realizado los cálculos estructurales necesarios para garantizar que el carro se va a comportar dentro de unos límites adecuados. Tras definir los espesores y las uniones atornilladas entre elementos del carro, se ha realizado mediante el software de análisis de cálculo estructural Ansys Mechanical Workbench 2023 R1, las comprobaciones estructurales necesarias. Se han definido las condiciones de contorno, definiendo las uniones entre elementos, las zonas de sujeción y las zonas de aplicación de cargas.



Figura 11: Imagen del modelo CAD 3D objeto de análisis estructural donde se observan los resultados de deformaciones y tensiones.

No se consideró necesario la realización de cálculos cinemáticos, ya que las velocidades de trabajo máximas no se consideraron relevantes para el comportamiento estructural, y por lo tanto las tensiones que pudiesen aparecer serían despreciables. En base a los resultados obtenidos en el cálculo, se da como válido el diseño planteado y se procede a su fabricación.









Figura 12: Fotografía del carro del brazo robot integrado en el sistema de fabricación 3D y con el robot ABB montado

Además del carro estructural para permitir la integración del brazo robot, también fue necesario diseñar los elementos estructurales que nos permitiesen anclar tanto el cuadro de control de comunicaciones, como la controladora del brazo robot. Se decidió montarlos sobre la columna donde se encontraba ya el cuadro de la máquina, y de donde salían las cadenas portacables para llevar los cables necesarios a cada uno de los elementos de la máquina.



Figura 13: Fotografías de la estructura fabricada e integrada.









### DISEÑO Y DESARROLLO DE LA FUNDA DE PROTECCIÓN PARA EL BRAZO ROBOT

El proceso de trabajo se desarrolla en un ambiente polvoriento, condición que no solo es causada por el entorno al aire libre donde se ubica el sistema de fabricación 3D, sino también por el cemento en estado de grano fino con el que se trabaja. Este ambiente se complica aún más por el uso de agua en las inmediaciones del sistema de fabricación, la cual es necesaria para convertir el cemento en una mezcla de hormigón altamente viscosa, lista para ser insertada en el proceso. Por lo tanto, se determino que es esencial equipar al brazo del robot con una funda protectora.

Para ello, se diseñó una serie de elementos que se pudiesen integrar con la estructura realizada para el montaje del brazo robot, para poder montar una funda que le proporcione el mayor grado de estanqueidad posible al brazo robot sin restringir la movilidad al brazo robot. Además, también se diseñó una pieza para la zona del eje de unión con la garra que permitiese fijar la funda en ese punto y así permitir la movilidad de la garra sin el condicionamiento de la funda. Este elemento se diseñó teniendo en cuenta que se debía replicar el sistema de anclaje del robot, para poder montar las garras con los soportes ya disponibles para su montaje. Dejando eso sí, la garra fuera de la protección de la funda, pero para eso, ya se eligió una garra con una IP adecuada para las condiciones de trabajo a las que se iba a exponer.



Figura 14: Fotografía de la funda montada sobre los soportes y cubriendo completamente el brazo robot



DIFUSIÓN —







### DISEÑO Y DESARROLLO DE LA CUNA DE ALIMENTACIÓN DE ARMADURAS

Para poder validar el concepto desarrollado de trabajo colaborativo entre el brazo robot y sistema de impresión 3D, era necesario definir la posición en la que se iban a entregar los elementos seleccionados para la colocación de armaduras dentro del proceso.

Para ello se diseñó una estructura, que permitiese ser lo suficientemente versátil, para alimentar las posibles armaduras a integrar dentro del proceso. Las armaduras que finalmente se utilizaron para el demostrador final fueron las que tenían forma de varilla plegada en dos pliegues a 90 grados en direcciones inversas, con lo que le confería una forma simplificada de Z o S.

Se diseñaron unas piezas soporte que ayudasen a estabilizar la posición de la armadura en la estructura. Para ello se utilizaron como base la geometría de las pinzas que se realizaron para manipular la armadura, y en base a esa geometría se definieron unos elementos, que posicionados en diferentes puntos, permitía la colocación de la armadura en un punto determinado y asegurar el asentamiento de la misma en la posición definida dentro del proceso.



Figura 15: Imagen del diseño de la estructura y soporte de colocación de las armaduras seleccionadas

A continuación se muestra la disposición de las piezas soporte cuna sobre la estructura cuna planteada, para poder colocar sobre ellas la armadura y asegurar su adecuado posicionamiento para que el robot pueda ir siempre al mismo punto de recogida y asegurar la correcta manipulación de la armadura.











Figura 16: Imagen del diseño de la estructura cuna donde se colocan las armaduras seleccionadas



Figura 17: Fotografía del diseño de la estructura cuna donde se colocan las armaduras seleccionadas











### 4.3 INFORME DEL DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y LA INTERFAZ DE COMUNICACIONES.

SECUENCIA PARA LA FABRICACIÓN DEL DEMOSTRADOR.

La fabricación de edificios mediante capas sucesivas de hormigón en conjunto con la inserción mediante un robot de estructuras prefabricadas dentro de la construcción debe seguir una secuencia lógica y estandarizada para poder integrar el trabajo de cada uno de estos sistemas.

Para ello se ha definido un diagrama de flujo, mostrado a continuación en la figura 1, que describe la secuencia de trabajo que deben realizar los dos subsistemas dentro de la fabricación del demostrador.



Figura 18: Diagrama de flujo secuencia fabricación demostrador

DIFUSIÓN —









### ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Durante la fabricación 3D con hormigón se colocan distintos elementos estructurales para incrementar la capacidad de carga, aportar rigidez y estabilidad evitando la deformación de la construcción, así como proteger partes de delicadas.

Los elementos estructurales para el demostrador se han seleccionado con el apoyo de Bemore3D basado en su experiencia y con la finalidad de demostrar este tipo de tecnología al hibridar dos subsistemas como son la máquina de fabricación 3D y el brazo robótico.

Los elementos más utilizados a lo largo de la fabricación son las barras corrugadas debido a su bajo coste económico. Comparten propiedades con el hormigón al expandirse y contraerse casi al mismo ritmo con los cambios de temperatura sin producir grietas en el hormigón que lo rodea.

Las barras corrugadas debido a su ductilidad pueden ser cortadas o dobladas fácilmente para adaptarse a cualquier lugar. Para analizar las trayectorias que debería seguir el robot se han seleccionado dos tipos de barras corrugadas.

• Barra corrugada en forma de "Z"



Este tipo de barras se utiliza para unir dos líneas de impresión, aportando capacidad de carga dentro la estructura. Dependiendo del tipo de construcción pueden ser colocadas en diferentes ángulos de rotación según la capa de fabricación que se esté construyendo.

• Barra corrugada recta



Este tipo de barras normalmente se colocan de forma vertical para unir capas de impresión, aportando rigidez estructural a la construcción.











#### COMUNICACIONES ENTRE LOS SUBSISTEMAS

En el análisis de las características de cada uno de los subsistemas que se integran en el sistema hibrido se confirmó que todos disponen de módulos de entradas y salidas digitales por lo tanto la comunicación entre ellos se lleva a cabo utilizando este método.

• Configuración entradas y salidas sistema de fabricación 3D

Para el control del sistema de fabricación se utiliza la controladora Duet3D Open Source que está pensada para trabajar con impresoras 3D y máquinas de CNC.

Las entradas libres de la controladora que nos permiten detener el programa de impresión una vez finalizado en caso de necesitar que el robot coloque una armadura en un determinado punto se encuentran dentro del módulo **Stepper Channel 10&11** en los pines 4 y 3 correspondientes a ENC\_A y ENC\_B respectivamente.

Por su parte, las salidas localizadas se encuentran en el módulo **TEMP DAUGHTERBOARD** en lo pines 1, 3, 7 y 9 correspondientes a los denominados SPI\_CS del 1 al 4. Para configurar cada uno de estos pines como entradas y salidas dentro del software de la controladora es necesario acceder al archivo **config.g**.

• Configuración entradas y salidas brazo robótico

El controlador IRC5C Compact cuenta con un módulo de entradas y salidas digitales. En este caso el módulo que incorpora es el DSQC652 que tiene 16 entradas y 16 salidas dispuestas desde los bornes XS12 hasta el XS15.

Para poder utilizar los módulos de entradas y salidas digitales debe configurarse el sistema operativo del robot de forma que desde la aplicación se pueda interactuar con las señales digitales.

La lectura de las entradas puede ser visualizada en el FlexPendant pudiendo además activar y/o desactivar las salidas.









Aut Soloct on 1/0 Signals	to ERNABEU Activ	Motors On Stopped (Sp ve filter: S	eed 100%) Gelect Layout	¥ X	
Name /	ii tile list.	Value		Device	
DIO		0	DI	Denice	T-stile
DI		0	DI		Enable
D12		0	DI		
DI3		0	DI		Ĕ.L. A.
DI4		0	DI		
DI5		0	DI		
DOO		0	DO		
D01		0	DO		Hold To Run
D02		0	DO		
DO3		0	DO	$\checkmark$	
0	1			View 🔺	00
Production Window	<i>⊉</i> 1/0			®®	

Figura 19: Visualización las entradas y salidas en el FlexPendant - Robot

• Configuración entradas y salidas sistema de agarre

La configuración de las comunicaciones del sistema de agarre se realiza por medio del dispositivo denominado "ComputeBox" que dispone de un módulo 8 entradas digitales y otro para las salidas.

				0
	-24V -001 -002 -003 -004 -004 -004 -004 -004 -004 -004		012	2
	COLLED			
19	MAX 0.1A	FIX IP ADDRESS: 192.1	68.1.1	0

Figura 20: Modulo de entradas y salidas digitales ComputeBox

Para controlar la apertura y cierre de la garra, así como la fuerza que tiene que ejercer por medio de estas entradas y salidas es necesario configurarlas dentro del software en el apartado WebLogic.

Dentro de este entorno se han configurado las dos garras, que en ambos casos son activadas cuando reciben un HIGH "1" desde la controladora del robot en la entrada DI1 y son desactivadas con LOW "0". Para que la controladora del robot sepa que cada una de las instrucciones han llegado a la garra, esta responderá con un "1" cuando este activa y con un "0" cuando no lo esté en la salida DO1.

La pinza paralela 2FG7 ha sido configurada con una apertura, cierre y fuerza necesarias para poder coger la armadura con firmeza.









• Diseño de un cuadro auxiliar para las comunicaciones

Realizada la configuración de las entradas y salidas de cada uno de los sistemas, se vio la necesidad de diseñar un cuadro eléctrico auxiliar para enlazar estas comunicaciones debido a dos factores importantes:

- Las entradas y salidas de controladora Duet3D trabajan con un voltaje de 3.3V muy por debajo de los 24V con los que trabajan las entradas y salidas tanto del controlador del brazo robótico como de la garra.
- Las entradas de la controladora Duet3D se activan con un cero lógico, al contrario de las salidas del controlador del brazo robótico que trabaja con lógica positiva.

Dentro de este cuadro auxiliar se instaló también la ComputeBox, un PLC S7-1200 y un switch para realizar las pruebas y configuraciones de cada uno de los subsistemas por separado simulado las entradas y salidas que deberá recibir y enviar para comprobar que todo funciona correctamente antes de integrarlo en un solo conjunto.

• Mapeo de comunicaciones

Para poder programar que tareas debe realizar cada uno de los subsistemas (y cuando) es imprescindible tener claro las conexiones eléctricas entre las entradas y salidas que compartirán cada uno de ellos.

Para lo cual se realizó el siguiente mapeo:

- Señales del módulo **TEMP DAUGHTERBOARD** de la controladora Duet3D al módulo de entradas **XS12** de la controladora IRC5C del robot ABB.
- Señales del módulo de salidas XS14 de la de la controladora IRC5C del robot
   ABB con el módulo Stepper Channel 10&11 de la controladora Duet3D.
- Señales del módulo de salidas ComputeBox con el módulo de entradas XS14 de la de la controladora IRC5C del robot ABB.

Las conexiones eléctricas entre la ComputeBox y las distintas pinzas se realizaron por medio de las conexiones internas del brazo robótico como se detalla a continuación.











Figura 21: Conexiones entre la Pinza en robot hasta la ComputeBox

• Pruebas del sistema de agarre

Las pruebas de los sistemas de agarre se realizaron en el laboratorio simulando puntos de recogida y dejada de cada una de las armaduras.

Se realizaron distintas pruebas con cada uno de los modelos de dedos diseñados y fabricados para esta pinza.

Se realizó también un segundo diseño para tener un mejor agarre de los elementos, dando mayor rigidez a los dedos y obtener una zona en la cual nos permita empujar la barra corrugada recta dentro de cordón de impresión.

Para validar este segundo diseño se realizaron las mismas pruebas que con el modelo anterior permitiendo obtener una comparativa.



Figura 22: Pruebas segundo modelo de dedos barra corrugada en forma de "Z" y recto.



DIFUSIÓN —









Con las pruebas realizadas se ha podido comprobar que este segundo diseño ha logrado conseguir un mejor agarre de cada una de las armaduras aportando rigidez a la barra durante los movimientos del robot y con ello mayor precisión al momento de colocarlos dentro de cada capa de impresión.

Con la finalidad de reducir el tiempo de ciclo y tomando en cuenta la naturaleza férrica de las armaduras también se ha considerado la utilización de la pinza electromagnética. De igual forma que en el caso anterior para las pruebas de esta pinza se utilizaron los dos tipos de armaduras.

Durante las pruebas que se efectuaron con este sistema de agarre, se pudo determinar ciertos inconvenientes al momento de recoger y mover las armaduras ya que tendían a desplazarse y/o girarse tal y como se observa a continuación.



Figura 23: Problemas sistema de agarre pinza electromagnética

• Selección del sistema de agarre

Después de haber probado cada sistema de agarre y comparado sus ventajas e inconvenientes se ha determinado que:

- La pinza paralela tiene mejor agarre de cada tipo de armadura y posiciona con gran precisión en un punto determinado, el inconveniente de este tipo de sistema es que los dedos pueden sufrir cierto tipo de desgaste con el tiempo o que por el entorno en el que trabaja se llene de material impidiendo que sujete correctamente las armaduras. Por otro lado, el tiempo de ciclo es más elevado con relación la pinza electromagnética.
- La pinza electromagnética por el contrario no ha tenido las prestaciones esperadas al momento de sujetar las armaduras y posicionarlas con precisión en un punto determinado a pesar de que su tiempo de ciclo es más rápido al no tener apertura ni cierre.

DIFUSIÓN —







Tomando como referencia los puntos anteriores se concluyó que el sistema a utilizar durante la realización de este proyecto es el sistema de agarre conformado por la pinza paralela 2FG7 y el segundo modelo de dedos diseñados.

### PROGRAMACIÓN SISTEMA ROBÓTICO

Para incorporar este subsistema dentro del sistema hibrido de fabricación es necesario determinar la secuencia de cada una de las tareas que deba realizar para su posterior programación y pruebas.

La secuencia de las tareas que debe realizar el brazo robótico durante el proceso de fabricación se describe en el gráfico a continuación.



Figura 24: Secuencia de tareas del brazo robótico

- Secuencia tarea 1:
  - El robot debe moverse desde su posición de reposo hacia el punto de recogida de la armadura en la cuna.
  - La pinza se cierra para sujetar la armadura.
- Secuencia tarea 2:
  - El robot debe moverse según el tipo de armadura y el ángulo de posicionamiento al punto de dejada dentro de la fabricación.
  - La pinza se abre para soltar la armadura.









Financiado por la Unión Europea

DIFUSIÓN —

En ambos casos el robot debe volver a su posición de reposo y notificar que ha finalizado la tarea. La posición de reposo será aquella que el robot pueda adoptar sin interferir en los movimientos del sistema de fabricación 3D.

### • Programación secuencia de tareas

Las secuencias definidas en el punto anterior han sido programadas en el software "RobotStudio" propio del fabricante. En primer lugar, ha sido necesario definir qué significado dentro del código de programación tiene cada una de las entradas y salidas digitales previamente configuradas.

Definición entradas digitales:

DI	Significado
0	Estado Pinza, 0 Cerrada, 1 Abierta
1	Coger Herraje, 0 No coger, 1 Coger
2	Dejar Herraje, 0 No dejar, 1 Dejar
3	Tipo Herraje, 0 Tipo "Z", 1 Recta
4	Girar Herraje, 0 No girar, 1 Girar 90

Tabla 2: Definición de entradas digitales dentro del programa robot

Definición salidas digitales:

DO	Significado
0	Estado Pinza, 1 Abrir, 0 Cerrar
1	Fin programa robot. Reanudar fabricación

Tabla 3: Definición de entradas digitales dentro del programa robot

Para que la programación sea lo más clara posible se han utilizado funciones para cada una de las tareas. La descripción de la programación de las funciones utilizadas dentro de la programación de las secuencias se encuentra a continuación.

- Función coger: El punto programado para recoger la armadura dentro de la cuna es el mismo para los dos tipos de armadura, con lo cual se tiene una única función.
- **Función dejar:** Para posicionar cada una de las armaduras en el punto y ángulo deseado el robot debe adoptar diferentes posiciones.
  - Función dejar armadura corrugada en forma de "Z" sin giro
  - Función dejar armadura corrugada en forma de "Z" con giro de 90º
  - Función dejar armadura corrugada recta









- Funciones para activar salidas digitales
  - ¿Hay que abrir la pinza?
  - ¿Hay que cerrar la pinza?
  - o ¿Hay que reanudar la fabricación?
- Funciones para leer entradas digitales
  - o ¿Qué tipo de armadura es?
  - o ¿La armadura hay que dejarla con algún giro?
  - ¿Hay que coger armadura?
  - Hay que dejar armadura
- Pruebas movimientos del brazo robótico

Las pruebas iniciales de los movimientos del robot se realizaron en el laboratorio, por lo cual fue necesario utilizar un pórtico diseñado específicamente para validar la posición más adecuada del robot dentro de la máquina de fabricación garantizando el alcance máximo del brazo sin interferir con el cabezal de impresión.

Otro de los objetivos de estas pruebas fue buscar el sitio más idóneo en el que posicionar la cuna de armaduras para que el robot pueda coger cada una de ellas sin mayor riesgo de colisión y comprobar que efectivamente el robot sea capaz de adoptar una posición para dejar cada tipo de armadura dentro de la zona de impresión con la mayor exactitud posible evitando que la máquina de fabricación tenga que realizar grandes desplazamientos para posicionar al robot en la vertical de dicho punto.

A continuación, se describe la secuencia de pruebas llevadas a cabo durante esta fase del proyecto. Las pruebas se realizaron tanto para la armadura recta como para la armadura en forma de Z.

- 1. Recoge la armadura: llega a una posición de aproximación, baja hasta la posición de recogida y cierra la pinza.
- 2. Regresa a la posición de reposo: vuelve a la posición de aproximación utilizando como punto de paso para ir a la posición de reposo con la armadura recta.













Figura 25: Regresar a la posición de reposo con la armadura en forma de "Z"

3. Coloca la armadura sobre el mortero: parte de la posición de reposo con la armadura sujeta en la pinza, llega a un punto de aproximación sobre el mortero, baja hasta el punto de colocación y abre la pinza.



Figura 26: Colocar armadura recta en el mortero











Figura 27: Colocar armadura en forma de "Z" en el mortero

4. Regreso a la posición de reposo: vuelve al punto de paso anterior como precaución en caso de que la armadura se pueda mover con los movimientos de robot y se mueve al punto de reposo finalizando la tarea.

También se realizan pruebas de la armadura corrugada en forma de "Z" girada, se diferencian de las de forma de Z únicamente en el movimiento que debe efectuar la muñeca del robot para posicionar la armadura con el ángulo deseado.

En una siguiente fase de pruebas se realiza la secuencia con mortero y la cuna de armaduras. Para estas pruebas se ha colocado el mortero debajo del pórtico en un lugar al que el robot pudiera tener fácil acceso. Las pruebas en laboratorio sólo se pudieron realizar con la armadura corrugada en forma de "Z" sin girar la herramienta debido a las limitaciones de espacio y a los alcances del robot respecto a su posición en el pórtico.

La secuencia de pruebas fue la siguiente:

- 1. Parte de la posición inicia/reposo/home.
- 2. Recoge la armadura
- 3. Regresa a la posición de reposo
- 4. Coloca la armadura sobre el mortero











Figura 28: Colocar armadura, pruebas con prototipo de motero y cuna de armadura

5. Regreso a la posición de reposo

### PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE FABRICACIÓN 3D

El sistema de fabricación 3D interpreta programas realizados con el lenguaje de programación G-code. Un programa realizado con el lenguaje G-code indica los movimientos relativos del cabezal de impresión a una posición dada, con qué velocidad, si el motor de extrusión del mortero tiene que estar o no en marcha, y la velocidad con la que se tiene que extruir el material por el cabezal de impresión para cada una de las capas de la construcción a realizar.

• Estructura del código G-code de impresión 3D

La estructura general de un fichero de fabricación con el lenguaje G-code es:

G-code		
	Prólogo	
	Capas	
	Epílogo	



DIFUSIÓN —









En el prólogo se establecen los parámetros por defecto de la fabricación como, altura de la capa, coordenadas máximas y mínimas que tendrá la fabricación en cada uno de los ejes de coordenadas, velocidad de movimientos, velocidad de extrusión y posición inicial de la impresión.

Posteriormente, viene cada una de las capas a imprimir. Estas capas constan de una secuencia de movimientos en el plano de impresión relativos al origen de coordenadas establecido con anterioridad a la fabricación tras la puesta en marcha del sistema.

Por último, en el epilogo se indican directivas adicionales del proceso de impresión.

• Integración secuencias para colocar armaduras en G-code de impresión

La secuencia de colocación de armadura es una tarea que se realiza al final de impresión de una capa de fabricación y antes de que empiece la siguiente en el caso de que la hubiera. Para lo cual es necesario intercalar dentro del programa de impresión una secuencia de movimientos de la máquina de impresión 3D que permita al brazo robótico recoger la armadura de la cuna y colocarla en el punto deseado.



Figura 30: Integración de la secuencia de para colocar armadura en el G-code

La secuencia de colocación de armaduras contempla todas las recogidas y colocaciones de armaduras que necesita una capa de fabricación 3D. Más concretamente, la secuencia sitúa la máquina de fabricación en el punto de recogida de los elementos estructurales, envía al sistema robótico las instrucciones necesarias para iniciar el programa de recogida y queda a la espera hasta que la recogida finalice.

Posteriormente a la recogida, la secuencia procede a resituar la máquina de fabricación en las coordenadas correctas para que el sistema robótico auxiliar pueda



DIFUSIÓN







proceder a la colocación de la armadura sobre la capa de mortero, también indica al sistema robótico auxiliar que inicie el programa de colocación de la armadura en la capa de fabricación, y por último se mantiene a la espera hasta que el sistema robótico auxiliar concluye la colocación de la armadura sobre el mortero de la capa de fabricación.

Una vez que se haya finalizado la colocación de la armadura, el sistema de fabricación reanudará su ejecución para proceder a colocar otra armadura en otra posición de la capa o bien continuar con la siguiente capa de la fabricación 3D, tal como describe la siguiente figura.



Figura 31: Secuencia de tareas en la máquina de fabricación 3D

En el G-code el concepto de "macro" se puede definir como una secuencia de instrucciones sencillas o conjunto de ellas que realizan una sola operación o tarea. De esta forma posibilita la ejecución organizada de instrucciones que comprenden una operación específica a partir de una orden. Se han desarrollado las siguientes macros:

- Macro pausar
- Macro secuencia
- Macro coger

DIFUSIÓN —

- Macro dejar armadura con forma de "Z"
- Macro dejar armadura con forma de "Z" girada
- Macro dejar armadura recta











#### SISTEMA DE SEGURIDAD SISTEMA HIBRIDO

La unión de dos sistemas en uno solo obliga a tener un sólo sistema de seguridad que en caso de algún fallo o emergencia sea capaz de detener tanto a la máquina de fabricación 3D como al brazo robótico. Para cumplir con ello, se conectaron a los bornes de seguridad de la controladora del robot los contactos libres del relé de seguridad instalado en el cuadro eléctrico de la máquina de fabricación.

#### PT5- ANALISIS DE PROCESOS INTEGRADOS DE IMPRESIÓN Y ELEMENTOS DE ACABADO.

5.1 INFORME DE APLICACIONES DEL SISTEMA HIBRIDO Y PARÁMETROS DE PROCESO ASOCIADOS

DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN INTEGRADA PARA UNA DETERMINADA APLICACIÓN

• Establecimiento de la aplicación para la integración del sistema de impresión 3D y el sistema robótico

Se valoraron diferentes procesos y se decidió seleccionar la colocación de elementos auxiliares durante el proceso de impresión porque en el que más deben interactuar los dos sub-sistemas que forman el sistema híbrido ya que los elementos auxiliares se introducen durante el proceso de impresión. En otras aplicaciones como es la mejora del acabado superficial, la incorporación de aditivos o la colocación de revestimiento es posible aplicarlo cuando se ha finalizado la impresión. Cabe destacar que la empresa 3D CONCRETE S.L. ha colaborado activamente en la decisión del tipo de aplicación a desarrollar en el proyecto.

Los elementos auxiliares seleccionados son unas armaduras en forma de Z para reforzar el comportamiento del hormigón. A continuación, se muestra una imagen de la armadura cuya longitud es aproximadamente de 26 cm. Las armaduras han sido aportadas por la empresa 3D CONCRETE S.L.













• Integración de los dos sistemas a nivel operativo

A nivel operativo la integración de ambos sistemas se realiza a través del fichero GCODE que contiene las instrucciones y la información de la impresión de todas las capas, el recorrido del cabezal, la velocidad de avance del cabezal así como la velocidad de extrusión. En dicho fichero se realiza una pausa tras un determinado comando, dicha pausa llama a una MACRO donde se encuentra el código que controla los movimientos y las acciones del robot. Una vez el robot ha acabado su actuación le manda una señal a la máquina impresora para que continue su GCODE y siga la impresión de mortero. Las llamadas vía Macro se pueden intercalar en cualquier instante del programa GCODE principal.

Para la generación del GCODE de impresión se utiliza el software libre "Ultimaker Cura", donde se importa la geometría, se coloca y orienta correctamente en el espacio de impresión, se establecen los parámetros del proceso de impresión y se capea la geometría o lo que es lo mismo se divide la geometría en finas capas o lonchas de un determinado espesor. El resultado de este proceso de asignación de parámetros y de capeado se recoge en un fichero GCODE que lee la máquina.

• Diseño y desarrollo del GCODE principal para la aplicación de armaduras durante el proceso de impresión 3D

A continuación, se muestran los pasos desarrollados para la obtención del GCODE de impresión 3D para la aplicación seleccionada.

### Paso 1. Diseño CAD de la geometría a imprimir

Se ha diseñado una pieza en forma de L con el objetivo de colocar las armaduras entre sus lados. El dimensionado de esta pieza demostrativa depende de dos ítems, por un lado, de la longitud de las armaduras a colocar (26 cm) y el diámetro de la boquilla con la que se realiza la impresión y con la que se define la anchura del cordón. En este caso se seleccionó una de las boquillas ya disponibles en la máquina SMART de diámetro de salida 5 cm.

En el proceso de diseño de la pieza ya se debe contemplar la orientación de fabricación y tener en cuenta cómo crece la pieza capa a capa. Además, es importante generar tanto el sólido como superficie ya que el proceso de segmentación es diferente en función de tipo de geometría que se incluye.













Figura 33: Modelo sólido de la pieza demostrativa

Los modelos se guardan en formato STL para continuar con el procedimiento.

### Paso 2. Configuración de la máquina SMART y de la boquilla a utilizar

En el software Ultimaker Cura se selecciona la impresora disponible donde se incluye las dimensiones del espacio útil de impresión y se establece las dimensiones del diámetro de salida de la boquilla de extrusión que condicionan el ancho mínimo del cordón de impresión.

SMART 2X2 AIDIMME 35 mm	Ajustes de la máquina					>	< 5.0mm 🔀 0% 🎧 Apagado 🛃 Apagad
	SMART 2X2 AIDIN	IME 35 mm					
		Impresora		Extru der 1			
	Ajustes de la impreso	ra					
	X (anchura)	2000.0	mm	Ajustes del cabezal de impresión	0	00.00	
	Y (profundidad)	2000.0	mm	X mín	0	mm	
	Z (altura)	2000.0	mm	Ymáy	0	mm	
	Forma de la placa de impr	esión Rectangula	ar v	Ymáx	0	mm	
	Origen en el centro			Altura del puente	2000.0	mm	
	Plataforma calentada			Número de extrusores	1	~	
	Volumen de impresión cal	entado		Aplicar compensaciones del extrusor a	•		
	Tipo de GCode	Marlin	~	Gcode			
	Iniciar GCode			Finalizar GCode			
	G1 315.0 F6000 ;Md ;Prime the extrude d92 E0	ove the platform down 1 er	L 5mm	G1 215 F600 G1 X0 Y0			
<ul> <li>Lista de objetos</li> </ul>							
demo_facons_01.STL							
CFFFP_demo_facons_01							
500.0 x 1000.0 x 400.0 mm							Segmentación



DIFUSIÓN —







### Paso 3. Posicionamiento y orientación de los ficheros para su impresión

Una vez se dispone de un fichero STL se importa en el software de Ultimaker Cura donde se coloca dentro del espacio de impresión de la máquina. Por defecto la pieza se coloca, haciendo coincidir el centro de la zona de impresión con el centro de masas de la pieza a colocar. Como esta pieza es la pieza demo en la que el sistema robotizado realizará la acción de recoger y colocar una armadura es necesario dejar un espacio de actuación del brazo robot y por lo tanto no se puede dejar la pieza en el origen de la máquina sino debe estar desplazado al menos 700 mm en el eje X y 300 mm en el eje Y.



### Figura 35: Colocación pieza demostrativa

### Paso 4. Introducción de los parámetros de impresión

Se incluye el espesor de capa, el ancho de cordón, la velocidad de avance de la boquilla extrusora, etc....

### Paso 5. Segmentación y previsualización del proceso de segmentación

El proceso de segmentación es la división de la geometría en capas. El número de capas depende del espesor de capa asignado y la altura de la geometría. Una vez se ha segmentado la geometría se visualiza como es el proceso de impresión.











Figura 36: Simulación del proceso de impresión completo

### Paso 6. Generación del GCODE

Una vez se ha comprobado que la simulación se ajusta a lo que se pretendía, se guarda el fichero en modo GCODE. Una vez guardado es posible abrirlo con un editor de textos.

Una vez se ha generado el GCODE hay dos opciones. Abrir el GCODE en el software de control de la máquina SMART e imprimir o es posible modificar el GCDODE mediante MACROS para la actuación de un elemento auxiliar como es el robot.

A continuación, se muestra un esquema del proceso de generación del GCODE:











Figura 37: Esquema para la obtención de un GCODE

Cabe destacar que parte de los parámetros de proceso se definen durante el proceso de generación del GCODE pero otros parámetros como es el flujo que sale por la boquilla y la velocidad de avance se modifican durante el proceso de impresión ya que dependen del estado del mortero y se modifican en el software de control de la máquina.

En caso de ser un material muy seco hay que aumentar el flujo, aumentando el factor de extrusión y en ocasiones conectar el vibrador para que el material salga correctamente por la boquilla. Si el material está más líquido es necesario reducir el factor de extrusión y desactivar el vibrador.

DIFUSIÓN —











DISEÑO, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE NUEVOS CONCEPTOS DE BOQUILLAS DE IMPRESIÓN DE MORTERO

### DISEÑO DE NUEVAS BOQUILLAS DE IMPRESIÓN DE MORTERO

En esta actividad se ha trabajado junto con la empresa 3D CONCRETE S.L modificando la geometría de las boquillas de impresión. A partir de las primeras boquillas planteadas conjuntamente con la empresa, AIDIMME estableció un conjunto de modificaciones de las boquillas para mejorar el acabado superficial del cordón de impresión y mejorar la compactación del material durante el proceso de impresión.

Todos los diseños de boquillas establecidos parten del diseño de las boquillas originales disponibles en la máquina SMART que tienen forma cónica y con salida circular.

La empresa 3D CONCRETE S.L planteó un nuevo diseño de boquilla que fue modificado por los técnicos de AIDIMME para que la boquilla fuese imprimible con tecnologías de fabricación aditiva de polímero disponibles en AIDIMME. El diseño planteado fue el siguiente una sección de salida cuadrada e incluyendo un canal de salida.



Figura 38: Diseño 1. Boquilla cuadrada (45x45 mm, Altura 160 mm) y Diseño 2 fabricado. Boquilla cuadrada (45x45 mm, Altura 190 mm)

La empresa 3D CONCRETE S.L validó el diseño cuadrado de las boquillas mediante pruebas reales en sus máquinas.











Figura 39: Validación del Diseño 2. Boquilla cuadrada (45x45 mm, longitud 190 mm)

A partir de estas boquillas, AIDMME planteó nuevos diseños de boquillas cuadradas y circulares pero modulares, lo que permite aumentar la longitud de la boquilla en función de las necesidades del material. Además, diseño un elemento alisador de la parte superior de la capa durante el proceso de impresión que también forma parte del sistema modular y por tanto es fácil de colocar y quitar incluso durante la impresión.



Figura 40: Nuevas boquillas cuadradas (45x45 mm) y circulares (Diam 50.76 mm) modulares

Las nuevas boquillas diseñadas son las siguientes:

- Boquilla cuadrada (45x45 mm) con una altura de 170 mm
  - Prolongador de 50 mm (Altura total boquilla 220 mm)
  - Prolongador de 100 mm (Altura total boquilla 270 mm)



DIFUSIÓN







- ENTREGABLE PROYECTOS — 2023
- Prolongador de 50 mm + Prolongador de 100 mm (Altura total boquilla 320 mm).
- Plato alisador que se puede incluir en cualquier versión anterior.
- Boquilla circular (Diámetro 50.76 mm) con una altura de 170 mm. El diámetro de 50.76 mm se ha establecido para que el flujo de salida de la boquilla cuadrada y circular sea el mismo).
  - Prolongador de 50 mm (Altura total boquilla 220 mm)
  - Prolongador de 100 mm (Altura total boquilla 270 mm)
  - Prolongador de 50 mm + Prolongador de 100 mm (Altura total boquilla 320 mm).
  - Plato alisador que se puede incluir en cualquier versión anterior.
- DESARROLLO DE LAS NUEVAS BOQUILLAS DE IMPRESIÓN DE MORTERO

Las boquillas diseñadas han sido fabricadas con tecnologías aditivas de polímero lo que ha permitido de una forma rápida la obtención de las piezas para probarlas en la máquina de impresión.

A continuación, se muestran las opciones de boquillas diseñadas con los diferentes módulos.

### Boquilla de sección cuadrada:



Figura 41: Muestra de opciones de las nuevas boquillas cuadradas (45x45 mm) modulares con los accesorios











#### Boquilla de sección circular:



Figura 42: Muestra de opciones de las nuevas boquillas circulares modulares con los accesorios

 EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS NUEVAS BOQUILLAS DE IMPRESIÓN DE MORTERO

Se realizaron varias pruebas con el fin de validar las ventajas que aporta cada una de las boquillas siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente.

El diseño realizado es un diseño sencillo que contiene zonas rectas y curvas para conocer cómo afecta a los distintos tipos de pared la forma de la boquilla. En este caso se ha optado por una geometría en sólido diseñada con Solidworks. Una vez disponible el diseño, se obtiene el fichero STL y se continúa con el posicionado de la pieza, la asignación de parámetros, segmentación y obtención de GCODE en el software Ultimaker Cura.



Se ha configurado el extrusor para una boquilla de 45 mm y otra para una boquilla de diámetro aproximadamente de 50 mm. El resto de parámetros son los mismos para ambas boquillas (espesor de capa de 15 mm) y se ha seleccionado el modo esperialize para que la cota Z vaya adaptándose a modo de espiral durante el proceso de construcción.



Figura 44: Segmentación de la geometría

Se han obtenido dos GCODES para estas pruebas. La diferencia entre ellos se centra en el diámetro del extrusor o boquilla.

A continuación, se muestran imágenes de algunas pruebas realizadas con los diferentes módulos de las boquillas:



Boquilla estándar de la máquina SMART:

Figura 45: Boquilla estándar SMART











Boquilla cuadrada:



Figura 46: Boquilla cuadrada

Boquilla cuadrada con plato alisador:



Figura 47: Boquilla cuadrada con plato alisador









Boquilla circular con prolongador de 100 mm:



Figura 48: Boquilla circular con prolongador de 100 mm

Tras la experiencia realizada con diferentes modelos de boquilla se concluye que las boquillas de sección cuadrada generan esquinas como chaflanes, esto da una textura particular a las piezas impresas, este efecto podría eliminarse si la boquilla tuviera un movimiento de rotación sobre sí misma que permita adaptar la sección cuadrada a la trayectoria de la boquilla durante el proceso de impresión.

El efecto anteriormente descrito, esquinas achaflanadas, no se produce con boquillas de sección circular. Además, se ha alargado la sección de salida de las boquillas, a mayor longitud de sección de salida más homogéneo y más compacto sale el material durante el proceso de impresión.

Por último, se ha probado colocar un elemento alisador en la salida de la boquilla que alisa sutilmente la parte superior de las capas pero su efecto no se transmite en la dirección de construcción.

DIFUSIÓN —











#### 5.2 INFORME DE LA MEJORA DE ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

### ANÁLISIS DE INFORMES Y ESTUDIOS PREVIOS COMPARATIVOS DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE IMPRESIÓN 3D Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES.

Diversos estudios ambientales confirman el potencial de la tecnología de impresión 3D de hormigón para reducir el peso de los productos de construcción fabricados y con ello la huella de carbono de los mismos.

Sin embargo, cuando se compara la impresión 3D con el hormigón prefabricado, la materia prima final en el producto no es el único factor a considerar. Según se puede ver en dos estudios analizados, el material metálico utilizado para el encofrado en el caso del hormigón prefabricado, supone una importante parte del impacto ambiental de la fase de producción. Siendo este el principal impacto en uno de los estudios, y relevante en el segundo, destaca ya una de las ventajas competitivas de la impresión 3D frente al hormigón prefabricado. La magnitud de dicha ventaja vendrá dada por las necesidades de material de encofrado en cada producto específico, su grado de reutilización y su relación respecto a la cantidad de materias primas.

### MODELIZACIÓN PROPIA DE CASOS COMPARATIVOS DE IMPRESIÓN 3D Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES.

Pese a los interesantes resultados de los estudios analizados, se ha optado por realizar una modelización propia en software de análisis de ciclo de vida con los datos de cantidades de material recogidos en otros estudios comparativos de construcción tradicional e impresión 3D. De esta manera se puede focalizar mejor la obtención del resultado a la característica del diseño debido a la posibilidad de fabricación aditiva con hormigón, y no a las divergencias en la modelización específica de las materias primas.

• Comparativa en base al diseño de una estructura

Se ha solicitado un estudio de optimización estructural de una cubierta a la empresa Arqueha para el proyecto FACONS, con la consideración de la impresión 3D de forma comparativa a la construcción tradicional.











Figura 49: Diseños modelizados de la estructura arquitectónica considerada en dos versiones de diseño: en celosía y laminar.

Se parte de una construcción tipo cubierta, que puede realizarse como estructura laminar o en celosía. Dicha estructura fabricada por métodos convencionales parte de la siguiente distribución de materiales y pesos. En cualquier caso, como se puede apreciar en la tabla, el componente mayoritario es el mallazo de acero.

Materiales para la estructura laminar	Base de partida	Modelo optimizado para impresión 3D	% reducción
Acero mallazo (kg)	2.644.347,49	2.487151,39	5,94%
Hormigón	72.557,12	40.946,33	43,57%
Materiales para la estructura en celosía	Base de partida	Modelo optimizado para impresión 3D	% reducción
Acero mallazo (kg)	7.102.884,85	5865002,06	17,43%
Hormigón	194.893,02	96.556,37	50,46%

Tabla 4: Consumo materias primas en la fabricación de la cubierta sin optimización y optimizada para impresión 3D.

El análisis de impacto ambiental con la metodología de análisis de ciclo de vida Recipe de puntuación única, arroja resultados inferiores en relación del peso reducido mediante la optimización estructural.











Figura 50: Comparativa de la reducción de impacto ambiental global lograda en cada una de las versiones de diseño (celosía y laminar) mediante metodología EndPoint (Recipe)

Las mejoras logradas se corresponden prácticamente con la reducción de masa del acero. Esto es debido, tal y como se aprecia en el gráfico en red de la estructura en celosía previa a la optimización, a que el acero supone el principal impacto de la misma (99,8%).

Por lo tanto este tipo de estructura no sería el mejor exponente para visualizar el potencial de la fabricación aditiva.

El análisis de las 4 estructuras mediante una metodología Midpoint que considera los impactos en las diversas categorías de impacto de forma individual, arroja resultados similares, específicamente en la categoría de impacto de huella de carbono.

• Comparativa en base al diseño de una pared de hormigón.

Se han tomando como referencia 3 tipos de construcción del artículo *3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios* para una pared de hormigón, denominados respectivamente S1, S2 y S3.

En el presente proyecto se ha tomado las cantidades de materiales de cada uno de los modelos de dicho estudio y se ha analizado la consiguiente reducción de impacto ambiental debido a la reducción del consumo de cada tipo de materia prima, adaptando el volumen identificado en el artículo a la densidad del hormigón de impresión 3D utilizado en FACONS.









El S1 es el modelo de construcción tradicional que considera bloques de hormigón aireados unidos con mortero y marco de refuerzo de hormigón estructural con barras de acero. Se utiliza una pequeña cantidad de tablero contrachapado durante la fabricación.

El modelo S2 utiliza hormigón para impresión 3D, si bien sigue utilizando la misma estructura de hormigón con refuerzo de acero. Esta pared se imprimió inicialmente utilizando tecnología 3D, y las columnas reforzadas fueron moldeadas dentro de las paredes fijando primero la barra de refuerzo de acero y luego vertiendo hormigón en las proximidades de la pared hueca impresa. La viga reforzada se fundió de manera similar a la de S-1 con el uso de encofrado. En este caso se logró reducir casi totalmente el uso de tablero contrachapado, además del mortero y los bloques de hormigón.

Finalmente el modelo S3 utiliza únicamente impresión 3D, sacando el máximo partido a las propiedades y versatilidad de diseño que ofrece la tecnología.



Figura 51: Caso S1 y S2. Método convencional y. Método de impresión 3D con refuerzos estructurales convencionales.







DIFUSIÓN —







El análisis de los datos presentados en el artículo ha llevado a la siguiente modelización de las materias primas empleadas en cada caso.

Material	1 m <sup>2</sup> pared S1	1 m <sup>2</sup> pared S2	1 m <sup>2</sup> pared S3
Barras de acero corrugado (kg)	21,92	21,92	
Hormigón estructural 30 MPa (densidad 2465 kg/m3)	184,42	184,2	
Bloques de hormigón	112,48	-	
Mortero	12,08	-	
Tablero contrachapado	10,5	0,27	
Hormigón de impresión 3D	-	0,0584 m3= 140,16 kg	0.073 m3= 175,2 kg
Total	341,4	346,55	175,2

 Tabla 5: Modelización de las materias primas empleadas en cada caso.

La cantidad de hormigón para impresión 3D se ha adaptado para el material que imprime AIDIMME, cuya densidad se corresponde con 2400 kg/m<sup>3,</sup> con lo que considerando la densidad del material escogido en la base de datos Ecoinvent, se ajusta el inventario modelizado en 0,058 m3 para considerar el mismo peso de material.

Analizando los tres escenarios, el impacto ambiental por m<sup>2</sup> de pared calculado mediante la metodología de puntuación única Recipe, se extrae lo siguiente:

El escenario S1 convencional, los bloques de hormigón constituyen un 47% del impacto de la estructura. Este elemento es el que resulta principalmente modificado por la impresión 3D del caso 2, que mantiene el marco estructural de hormigón reforzado. Con un impacto de 2,31 pts/m<sup>2</sup> de pared, el modelo convencional tiene más del doble de impacto que el modelo S2 con 1,04 ptos/m<sup>2</sup>.

La reducción de impacto del 55% se debe principalmente a la sustitución de los 112,48 kg de bloques de hormigón más los 12 kg de mortero por los 140,16 kg de impresión 3D (lo cual no supone una reducción de peso en sí misma, sino que se debe a reducción del impacto de los materiales), y la práctica eliminación del tablero contrachapado necesario para el encofrado.

La modelización del escenario S3 en cuyo diseño se aprovechan las ventajas de la fabricación aditiva, sí arroja reducción significativa de peso, pasando de 341,4kg a 175,2 kg que suponen 0,262 ptos de impacto ambiental. Adicionalmente se elimina la necesidad del marco estructural de hormigón reforzado, mediante el uso de refuerzos internos (similar a la estructura del cartón corrugado).

Esto conlleva la eliminación del contachapado y de las varas de acero que se utilizan como refuerzo, quedando únicamente el hormigón impreso en 3D, logrando una reducción del impacto del 88,66% respecto al S1.









La siguiente imagen refleja la mejora progresiva del impacto ambiental que se logra en los dos casos donde se usa impresión 3D (S2 y S3) respecto a la construcción convencional (S1).



Figura 53: Reducción del impacto ambiental lograda en el uso de las materias primas con la aplicación de la impresión 3D en 1 m<sup>2</sup> de pared de hormigón. Metodología End Point Recipe H/A.

Si se analiza el impacto ambiental de cada material considerado, queda claro el gran efecto que tiene en el impacto la reducción o eliminación de materiales de encofrado y refuerzos, más que la reducción de la cantidad del propio hormigón. El hecho de que el hormigón contenga parte de grava reciclada apenas afecta a su impacto.

Cuando se analizan los tres escenarios mediante la metodología Mid Point CML-IA la reducción de impacto varía en función de cada indicador de impacto ambiental individual, siendo el promedio de reducción de impacto de S2 frente a S1 es del 63%, mientras que el promedio de reducción de impacto de S3 respecto a S1 es del 88%.

En relación con la categoría de impacto de huella de carbono, la reducción progresiva respecto al S1 de construcción convencional es del 53% en el S2 y del 87% en el S3.

Categoría de impacto	Unidad	1 m2 Wall S1	1 m2 Wall S2	1 m2 Wall S3	% red S2 vs S1	% red S3 vs S1
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	7,27E+02	3,11E+02	4,18E+01	57%	94%
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	9,37E+01	4,41E+01	1,18E+01	53%	87%
Ozone layer	kg CFC-11 eq	2,36E-06	4,77E-08	2,47E-08	98%	99%











depletion (ODP)						
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	3,11E+00	2,02E+00	1,08E+00	35%	65%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,72E-01	4,99E-02	2,58E-02	71%	85%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6,69E+03	5,64E+02	2,95E+02	92%	96%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9,01E-02	2,81E-02	1,44E-02	69%	84%
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	2,33E-02	1,24E-02	1,11E-03	47%	95%
Acidification	kg SO2 eq	1,97E-01	1,08E-01	2,08E-02	45%	89%
Eutrophication	kg PO4 eq	2,66E-02	1,08E-02	3,19E-03	59%	88%

Tabla 6. Impacto ambintal de los tres modelos de pared S1, S2 y S3 obtenidos con metodología Mid Point CML IA base-line.











### PT6- REALIZACIÓN DE PRUEBAS EN PILOTO DEMOSTRATIVO.

6.1 INFORME DE PRUEBAS REALIZADAS. DISEÑO DEL DEMOSTRADOR, PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA Y RESULTADOS OBTENIDOS.

### MONTAJE ROBOT EN EL SISTEMA DE FABRICACIÓN 3D

Lo primero que se realizó fue instalar el carro que permitirá la movilidad del robot dentro del eje "X" de la máquina de fabricación, para lo cual hubo que retirar diferentes elementos de la estructura existente para permitir un mejor acceso al montaje del nuevo carro.



Figura 54: Carro para la instalación del robot

Antes de instalar el robot junto al cabezal de impresión, fue necesario cambiar las cadenas portacables por unas de mayores dimensiones, para poder permitir el paso de los cables de potencia del robot, y de comunicaciones tanto para el robot como para la pinza, tal y como se muestra en la figura a continuación.

Seguidamente se montó la estructura para el soporte de la controladora del robot y para el cuadro eléctrico auxiliar para las comunicaciones entre la máquina de fabricación, robot y pinza.

Se instaló el controlador del robot y el cuadro eléctrico auxiliar en las estructuras previamente montadas. Seguidamente se montó el robot en el carro y por último se conectaron los cables de potencia y comunicación del robot.











Figura 55: Instalación robot en el carro

• Montaje de la funda de protección para el robot

Para proteger al robot de posibles daños, provocados por partículas de mortero suspendidas en el ambiente, que puedan ingresar entre los ejes del robot, ocasionando problemas en los motores para mover el robot a las posiciones deseadas o posibles salpicaduras de mezcla del hormigón durante la fabricación se procedió a instalar una funda que permite aumentar el grado de protección IP de todo el brazo.

Como primer paso se montó el aro móvil y para poder sujetar la funda al otro extremo del robot fue necesario añadir una segunda brida a la propia del robot.

Una vez que se instalaron cada uno de estos mecanismo, se procedió a sujetar la base de la funda en aro móvil y el otro extremo en la nueva brida, para sellar la apertura entre el aro móvil y el fijo se colocó una banda fabricada del mismo material que la funda tal y como se muestra a continuación. La funda por su parte tiene una abertura que permite conectar el cable para las comunicaciones con la pinza al conector de robot que lleva internamente estas señales hasta su base.





AT INSTITUTO VALENCI A INSTITUTO VALENCI





Figura 56: Instalación funda protectora en el robot

De la misma forma para proteger los conectores y cables de potencia y comunicaciones que llegan a la base del robot se añadió otra funda, que sella la parte posterior del robot.

Una vez realizada la instalación completa de la funda, y conectados adecuadamente todos los cables necesarios, se procedió al montaje e instalación de la pinza y la brida correspondientes, para la aplicación desarrollada.



Figura 57: Instalación de la pinza













### PRUEBAS DE IMPRESIÓN DEL DEMOSTRADOR EN VACÍO

Se realizó primero una prueba en vacío para comprobar que las trayectorias que la máquina de fabricación 3D realiza corresponden al diseño del demostrador.

El primer paso para realizar estas pruebas fue colocar la boquilla en el origen del eje "Z", a partir de esta altura la máquina seguirá las trayectorias programadas.

Se rotuló sobre la zona de impresión la forma que debía tener el demostrador sirviendo como patrón para la comprobación de los movimientos de la máquina de fabricación 3D.



Figura 58: Comprobación de las trayectorias del demostrador sobre la zona de impresión

### PRUEBAS DE INTEGRACIÓN DE LAS COMUNICACIONES EN EL ENTORNO DE FABRICACIÓN

• Pruebas integración de macros con G-code demostrador.

Con la finalidad de comprobar que las macros funcionaban correctamente y que la máquina de fabricación se movía a las posiciones deseadas, se probaron simulando la impresión del demostrador activando las salidas de la máquina comprobadas en el HMI del cuadro de pruebas y activando sus entradas desde el mismo entorno. Se probaron dos movimientos:

- Movimiento de la máquina a la zona de la cuna de armaduras
- Movimiento de la máquina a la posición de colocación de la armadura











Pruebas movimientos del robot en vacío

Para garantizar que el robot es capaz de llegar a las posiciones marcadas en la capa del demostrador, se probó cada uno de estos movimientos en vacío, es decir, se simuló la fabricación del demostrador y cuando era necesario la intervención del robot para colocar dichas armaduras la máquina de fabricación 3D se movía a al punto de la cuna en el cual el robot es capaz de recoger la armadura, una vez que ha cogido la armadura se pliega en su posición de "home", la máquina de fabricación se mueve hasta el primer punto en el que debe colocar dicha armadura y el robot realiza esta función volviendo a su anterior posición una vez terminada.

Esta secuencia se realizó de la misma forma para la segunda armadura, cuando el robot termina sus tareas lo comunica a la máquina de fabricación para que continúe con su trabajo de impresión de la siguiente capa.



### - Movimiento del robot para recoger la armadura en la cuna

Figura 59: Movimiento del robot para recoger la armadura, prueba en vacío

Movimiento de la máquina a la posición de colocación de la armadura











Primera y segunda armadura:



Figura 60: Pruebas colocación primera y segunda armadura.

#### PRUEBAS EN EL ENTORNO DE FABRICACIÓN CONTROLADO

• Pruebas de impresión con hormigón

Comprobado que la máquina de fabricación 3D sigue las trayectorias correctas de impresión y que realiza los movimientos adecuados para llevar al robot a sus distintas posiciones y que el robot es capaz de recoger las armaduras y posicionarlas a partir de dichas posiciones, se procedió a realizar pruebas de impresión con el hormigón.



Figura 61: Pruebas impresión demostrador









A parte de comprobar la geometría, se tenía que verificar la consistencia del material y la altura de impresión de cada capa, para que la armadura pueda quedar entre ellas. Se tenía en cuenta, que una vez posicionadas las armaduras, al depositar material para fabricar la siguiente capa, la boquilla no arrastrase alguna de las armaduras durante el proceso de fabricación.

• Pruebas colocación armaduras sobre la capa de impresión

Finalmente, se realización las pruebas de todo el sistema hibrido, combinando la impresión de demostrador y colocando las armaduras en las dos posiciones previamente programadas en cada una de las capas necesarias, siguiendo el siguiente proceso:

1. Termina la impresión de la primera capa del demostrador en la que es necesaria colocar las dos armaduras.



Figura 62: Fin de impresión de la primera capa en la se colocarán las armaduras

- 2. La máquina de fabricación se mueve a la posición de la cuna de armaduras programada.
- 3. El robot se aproxima al punto de recogida de armadura dentro de la cuna.
- 4. Se mueve al punto de recogida y cierra la pinza para poder sujetar la armadura.











Figura 63: El robot coge la armadura

- 5. Recoge la armadura y regresa al punto de aproximación para continuar con sus movimientos.
- 6. Recogida la armadura, el robot regresa a su posición "home" para que la máquina de fabricación pueda moverse al primer punto de colocación de armadura.



Figura 64: El robot vuelve a la posición "home" con la primera armadura

7. La máquina de fabricación se mueve al primer punto para colocar la armadura.



DIFUSIÓN —







- 8. El robot se aproxima al punto de colocación.
- 9. Baja hasta un punto manteniendo una distancia de seguridad y abre la pinza para colocar la armadura en su sitio.



Figura 65: El robot coloca la armadura en la primera posición

- 10. La armadura es colocada en la primera posición.
- 11. Vuelve a su posición de origen plegándose para que la máquina en caso de necesitar otra armadura vuelva a la posición de la cuna o continué con la impresión.
- 12. La máquina vuelve a la posición de la cuna de armadura
- 13. El robot recoge la armadura y regresa a la posición de "home"



Figura 66: El robot recoge la segunda armadura y vuelve a su posición de reposo

- 14. La máquina de fabricación se mueve al segundo punto de colocación de armadura.
- 15. El robot se mueve sobre el segundo punto en el que debe colocar la armadura.
- 16. Baja a la segunda posición para colocar la armadura abriendo la pinza









17. La armadura es colocada en la segunda posición.



Figura 67: La armadura es colocada en la segunda posición

- 18. Colocada la armadura el robot vuelve a su punto de origen o "home".
- 19. Como ya no es necesaria otra armadura, la máquina de fabricación vuelve al último punto donde se había quedado y retoma la impresión continuando con la siguiente capa.



Figura 68: La máquina vuelve al último punto y retoma la impresión

20. Terminada la capa en la cual es necesaria colocar las armaduras, la máquina para y vuelve a realizar el proceso como en la primera capa hasta colocar las dos armaduras en la capa.



DIFUSIÓN —









21. Colocación del segundo par de armaduras, para el caso de este demostrador se colocaron en las mismas posiciones que en la primera capa.



Figura 69: Colocación del segundo par de armaduras en la capa de fabricación

22. Una vez colocadas el segundo par de armaduras se continúa con la impresión de la última capa del demostrador.

Este proceso se puede realizar las veces que sea necesario y colocar las armaduras en las distintas posiciones que se requieran. Es importante que para la colocación de las armaduras, se tome en cuenta el desfase que tiene los centros del robot y la boquilla, debido a que la maquina se mueve en relación al centro de la boquilla. Para que el robot pueda colocar los distintos tipos de armaduras, en cualquier posición o ángulo, debe existir un gran espacio para llegar a cada uno.

### VALIDACIÓN DEL SISTEMA

El demostrador fabricado para validar este tipo de tecnología hibridando dos sistemas para que puedan trabajar conjuntamente se muestra a continuación.



Figura 70: Demostrador sistema híbrido









Mediante las pruebas realizadas a través del piloto demostrativo, se ha realizado la validación de los sistemas desarrollados y las modificaciones necesarias que facilitasen la consecución de los objetivos previstos.

Se ha realizado la implementación del brazo robot y los periféricos necesarios para poder realizar la integración en el equipo de impresión y obtener el equipo demostrador. Se ha realizado la instalación del demostrador en un entorno de fabricación controlado, donde se han implementado los sistemas desarrollados para los procesos reales.

El brazo robot se montó en el carro desarrollado que le permite moverse en el eje X de la máquina de fabricación, y también se le añadió la funda protectora para evitar daños por el ambiente polvoriento y salpicaduras accidentales.

También se instaló la pinza con los dedos desarrollado que permiten la manipulación de la armadura metálica que se inserta en la estructura.

Se realizaron pruebas en vacío para verificar las trayectorias del robot, y se integraron las comunicaciones entre la máquina, el robot y la pinza mediante macros y G-Code.

Se realizaron las pruebas de impresión para obtener un demostrador donde se aunase el proceso de impresión 3D con mortero y la colocación de armaduras metálicas con la asistencia del brazo robot, y los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios.

Para estas fases se ha contado con la colaboración de los técnicos de las empresas colaboradoras para obtener su retroalimentación con respecto a las experiencias piloto.













Domicilio fiscal — C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico) 46980 Paterna. Valencia (España) Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social — Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico) 46980 Paterna. Valencia (España) Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

> aidimme@aidimme.es www.aidimme.es