

# Calibración robotizada de la materia para *bioshotcrete*

Las técnicas de construcción asociadas a la arquitectura tradicional con tierra se caracterizan por recurrir a tareas manuales laboriosas en las que se suceden varias capas de mezcla de arcilla sobre un encofrado ligero, como en el caso de la técnica de los bajareques. Existen soluciones más sostenibles para el uso de cemento, como la proyección de materiales (*shotcrete*) o la pulverización de cemento sobre encofrados ligeros de tela, hinchables o de mallas metálicas. El presente estudio explora las técnicas robotizadas de fabricación digital de estructuras monolíticas de barro. Su objetivo es reformular el uso de la arcilla como material sostenible para reducir el recurso a tareas laboriosas, minimizar el uso de encofrados e implementar procesos de fabricación robotizada. Esta novedosa técnica se denomina *bioshotcrete* y se caracteriza por ser un proceso de fabricación innovador de aporte por pulverización robotizada secuencial con mezclas naturales y crudas de arcilla sobre un encofrado ligero temporal. Se describen y analizan dos casos de estudio que muestran dos técnicas distintas: la pulverización de mezclas de arcilla mediante un brazo robotizado y mediante drones. Se destacan los pormenores y se resaltan las consideraciones más importantes, como pequeños ajustes en la formulación de materiales y las secuencias de aplicación, las estrategias de herramientas robotizadas y las acciones robotizadas personalizadas. Esta serie de experimentos se ideó como un experimento en evolución para responder a desafíos como la limitación en la distancia de alcance y el peso de las máquinas que había que transportar hasta el emplazamiento de los trabajos, y para probar las posibilidades que ofrecen las técnicas recién descubiertas que utilizan drones para el aporte aéreo de material. En cada aplicación de mezcla de arcilla se estudiaba el funcionamiento de la herramienta con la materia (velocidad de pulverización y adhesión a la superficie). Recientes pruebas han introducido mejoras adicionales, como el uso de las corrientes de aire que generan las hélices de los drones para ayudar a secar las distintas capas. Nuevas conclusiones permiten determinar que esta técnica no solo está modificando los nuevos procesos de fabricación digital y de diseño sino que plantea posibles aplicaciones futuras y muestra nuevos escenarios para envolturas sostenibles de barro a gran escala.

MAITE BRAVO  
IAAC - Institute for Advanced Architecture of Catalonia

STEPHANIE CHALTIEL  
IAAC - Institute for Advanced Architecture of Catalonia

WILFREDO CARAZAS  
Ecole d'Architecture de Grenoble

PALABRAS CLAVE  
Arquitectura de tierra, shotcrete, drones, estructuras, fabricación digital, construcción robotizada, brazo robotizado, material digital, calibración iterativa.

CÓMO CITAR  
Bravo, Maite, Stephanie Chaltiel y Wilfredo Carazas. 2018. Bravo, Maite, Stephanie Chaltiel y Wilfredo Carazas. 2018. "Calibración robotizada de la materia para *bioshotcrete*" [Matter-Robotic Calibration for Bioshotcrete]. *Temes de disseny* 34: 78-89.

La arcilla se ha utilizado desde la antigüedad como material de construcción en la arquitectura vernácula y tradicional. Algunas técnicas como el uso de bajareques utilizan una trama de ramas flexibles a modo de encofrado perdido que se van recubriendo a mano por ambos lados con varias capas de arcilla (Guillaud, Houben 2015, 345-348). El resultado son unos paneles que se utilizan para la construcción por bloques o para la construcción de cúpulas y bóvedas monolíticas. Reconsiderar algunos de los principios en los que se sustentan dichas técnicas tradicionales de construcción ofrece un gran potencial: cuando se combinan con los últimos protocolos de diseño y los métodos de fabricación más recientes revelan un nivel de libertad inaudito, como la construcción de distintas bóvedas no regulares que funcionan solo por compresión (Block et al. 2010, 4-13) y que permiten que texturas y grosores variables obtenidos con geometrías optimizadas utilicen el mínimo de material para lograr la máxima resistencia (Burry y Burry 2010, 126-130).

Varios experimentos realizados en los últimos años mayoritariamente en entornos académicos proponen reconsiderar la arcilla como material tradicional y estudiar posibles formulaciones y aplicaciones con tecnología robótica (Fig. 1) que incluyan la fabricación aditiva con dos métodos de aporte de arcilla: la extrusión y la pulverización. Los primeros experimentos pusieron de manifiesto que la extrusión requiere mayor precisión (tolerancia de 1 mm) en la distancia, la velocidad del aporte, el tamaño y la forma de las boquillas, mientras que la pulverización admitía un mayor nivel de imprecisión (tolerancia de hasta 20 cm) en la distancia entre la boquilla y la superficie (Bravo, Chaltiel 2017, 15-18). Varios referentes en el sector de la construcción incluyen el uso de la tecnología de proyección de materiales (shotcrete), que presenta distintos niveles de automatización en la pulverización. Esta tecnología permite controlar varios aspectos del aporte de materiales como el grosor de la materia, el flujo y las grietas, y dicho control lo realizan profesionales de la construcción sobre el terreno. Recientes experimentos realizados en la Universidad Técnica de Brunswick (Alemania) han explorado el campo de la impresión robótica en 3D con pulverización de aporte por capas, y han logrado realizar modelos en 3D mediante proyección de materiales (*shotcrete*) sin necesidad de utilizar encofrados (DBFL TU Braunschweig 2018). Por otra parte, en los últimos años se han venido utilizando drones en el sector de la construcción, sobre todo para escanear en 3D los emplazamientos de las obras y dar información a los robots de producción, como se ha visto recientemente con las estructuras de fibra de carbono ondulantes de Achim Menges (Felbrich et al. 2018, 248-259). El proyecto de 2017 de Carlo Ratti Paint By Drone para pintar por pulverización utilizó drones personalizados. Otro ejemplo son los drones tejedores de Gramazio Kohler Research junto con el grupo del robotista Raffaello D'Andrea del Institute for Dynamic Systems and Control de ETH Zürich, que investiga los aspectos tecnológicos de vuelos preprogramados como parte de un experimento que utiliza drones para tareas que no son de grabación. La investigación

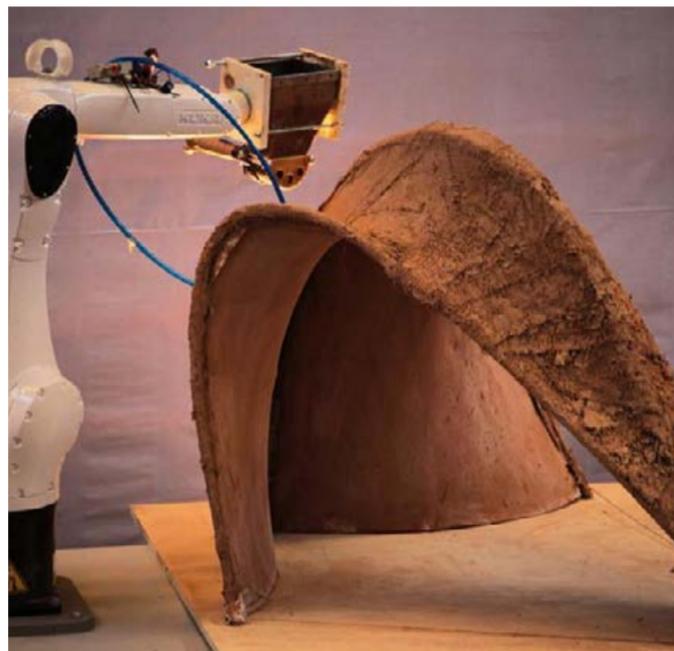


Fig. 1. Taller de Geometría Inteligente en Gotemburgo con estructuras monolíticas fabricadas por los autores con la técnica de pulverización robotizada de arcilla

se centró en la interacción concreta herramienta/materia que podía dar lugar a determinadas formas arquitectónicas, como ponían de manifiesto las paredes irregulares de la instalación Remote Material Deposition (Augugliaro et al. 2014, 46-64) con el lanzamiento robótico de pequeñas masas de arcilla. Algunos de estos recientes adelantos en tecnologías de fabricación digital están abriendo un fructífero campo de experimentación con novedosos procesos de diseño y nuevas técnicas de construcción, que permiten reproducir estructuras irregulares y optimizar el grosor de las estructuras de construcción para minimizar la cantidad de material utilizado, tal como se vio en el proyecto que Philippe Block desarrolló en África (Block et al. 2010 4-13).

Esta investigación explora la implementación de técnicas de pulverización de barro en encofrados ligeros para la construcción de estructuras monolíticas de barro utilizando un brazo robotizado o sistemas de aporte aéreo para la pulverización (como drones), y se centra en la calibración herramienta/materia para lograr una óptima adhesión a la superficie y la formación de una costra uniforme y homogénea.

## 2 EL ORIGEN DEL BIOSHOTCRETE

Un equipo pluridisciplinar de diseñadores, ingenieros y expertos en robótica están desarrollando una nueva técnica llamada *bioshotcrete*. Pretenden crear una versión más sostenible de la actual proyección de materiales (*shotcrete*) utilizando pasta no tóxica como materia en lugar de cemento, equipos más pequeños y un encofrado fácil de montar formado por fibras textiles naturales como el yute (Chaltiel y Bravo 2017, 94-97). Para crearlo hay que seguir con exactitud un proceso de minuciosa formulación de varias capas de arcilla que deben aplicarse en la secuencia correcta (Chaltiel

y Bravo 2017, 94-97). El objetivo es lograr la adhesión de la materia a la superficie y poder controlar mejor los grosores finales que se utilizan para construir armazones y cúpulas de barro monolíticos de grandes dimensiones en apenas unos días. El origen del bioshotcrete hay que buscarlo en la formulación de un material y de una secuencia de aplicación adecuados, en los avances en las estrategias de robotización y en el desarrollo de acciones robotizadas personalizadas.

### 2.1 Formulación de materiales pastosos para la fabricación aditiva

La arcilla presenta claras ventajas como material de construcción, pues tiene beneficios medioambientales al ser un recurso natural local con una gran disponibilidad, una baja entropía y una elevada inercia. Este estudio propone un protocolo para el aporte robotizado secuencial de mezclas de arcilla modificando la proporción de cada ingrediente de la mezcla. De ese modo se lograrán distintos niveles de consistencia, viscosidad, elasticidad y pegajosidad, entre otros aspectos. Además, la fabricación robotizada utilizando mezclas de arcilla requiere una formulación exacta de los materiales para lograr que la costra sólida se adhiera bien a la capa anterior o a la superficie inicial. Por tanto, cada capa de aporte tiene una composición distinta en la que los granos, las fibras, la densidad y la proporción de agua o de arcilla que actúa como aglutinante pueden variar enormemente (Fig. 2).

Se han formulado y probado tres tipos de mezclas de arcilla:

1. La capa líquida para la pulverización inicial llamada barbotina forma una fina costra sólida y homogénea que sustituye el encofrado ligero inicial. Esta capa hace que la adhesión de las capas posteriores aumente y permite quitar fácilmente la tela de encofrado ligero temporal al finalizar el proceso.
2. Las capas intermedias que contienen agua y arenas tienen un elevado contenido en fibras, que ayudan a dar grosor sin sobrecargar el delicado encofrado y a absorber el exceso de humedad. Estas capas gruesas proporcionan una elevada inercia.

3. Los revestimientos superiores contienen estabilizantes naturales como cal, que estando aún caliente, se combina con grasa animal, arcilla y arenas de granos de mayor diámetro que en capas anteriores.

Varias estructuras de entre 1 y 3 m de altura se construyeron pulverizando barro con robots sobre telas tensas siguiendo una formulación concreta de las capas de material (Fig. 2) que incluye una composición cuya granulometría y proporción de ingredientes es la siguiente:

- a- Capa de contacto o barbotina: formada por arcilla en polvo con un diámetro de grano inferior a 1 mm. 1 unidad (U) de arcilla por 2 U de agua;
- b- Refuerzos de tela porosos con distintas densidades de malla (como el yute) con una densidad mínima de 1 cm y que se aplican a mano;
- c- Capas 2, 3 y 4: 1 U arcilla + 1 U arena dura [2 mm de diámetro] + 1 U agua;
- d- Capas 5, 6 y 7: 1 U arcilla + 1 U arena dura [4 mm de diámetro] + 1 U agua;
- e- Capa de tela de refuerzo con una densidad de malla mínima de 0,5 cm. Se aplica a mano;
- f- Capas 8, 9 y 10: 1 U arcilla + 1 U arena dura [5 mm de diámetro] + 1 U agua. Se pueden añadir varios tipos de estabilizadores a la mezcla de arcilla de las capas superiores para impermeabilizarlas y para evitar la formación de grietas.

Se formularon y aplicaron varias mezclas en los casos de estudio. De todas ellas se compararán los parámetros que determinan la buena adherencia del material de aporte a la superficie del encofrado. Por otra parte, se describirán más detalladamente aspectos como la composición y la secuenciación. Esta descripción incluirá la secuencia de aplicación por fases, así como la composición del material: tipos de ingredientes, granulometría, proporciones de cada material, tiempos de secado y uso de estabilizantes.

### 2.2 Estrategias de robotización

Las herramientas robotizadas personalizadas para pulverizar distintos tipos de mezclas de arcilla en encofrados

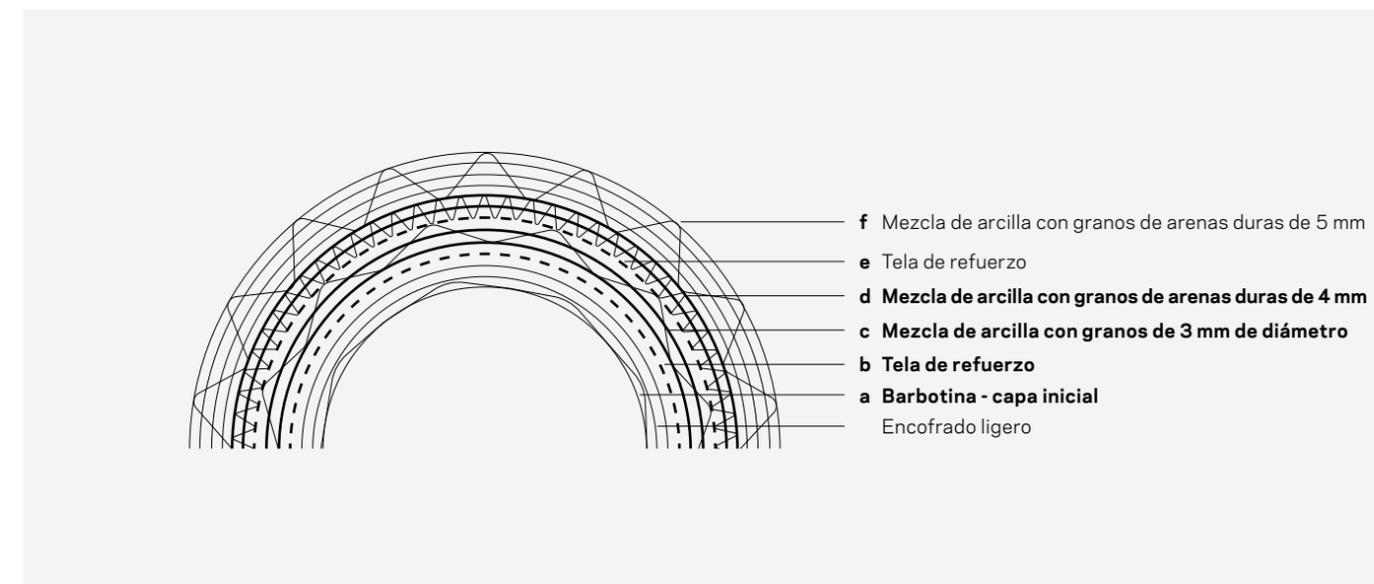


Fig. 2: Diagrama que muestra la sucesión de capas de arcilla que hay que aplicar en un encofrado ligero temporal.

ligeros han demostrado su utilidad, pues eliminan el uso de complejos andamiajes. Aun así, tienen ciertas limitaciones, como el alcance de los brazos robotizados en estructuras de grandes dimensiones. De ahí que se planteen alternativas como el aporte aéreo. Estas primeras iniciativas demuestran que la práctica de pulverizar mezclas de arcilla apenas se ha explorado, y esta investigación pretende proponer una secuencia de construcción robotizada para mezclas de arcilla utilizando brazos robotizados y drones. En el proceso, en el que intervienen el pulverizador, el contenedor del material, y el relleno continuo del aparato hasta lograr una estructura que se sostenga por sí sola, deben integrarse de manera coordinada la materia y las acciones robotizadas.

1. Contenedor del material: la primera parte del proceso de fabricación empieza con la mezcla de la arcilla utilizando herramientas del sector de la construcción (mezcladoras horizontales o giratorias). Una vez hecha la mezcla, hay que colocarla en un contenedor, donde debe removerse continuamente, tal como ya se había hecho previamente en otros casos, porque al ser la arcilla un material granulado tiende a pegarse a las paredes del contenedor y a dejar una “boquilla” con rebordes irregulares y no homogéneos que provoca diferencias en el recubrimiento.
2. Transporte del material: para el aporte de material se han explorado mecanismos de relleno con varias modalidades:
  1. Brazo robotizado con pulverizador manual de mortero que puede contener hasta 8 l de mezcla y que se puede conectar mediante una manguera a un compresor de aire en tierra.
  2. Aporte de materia con drones equipados con contenedores de entre 5 y 35 kg de capacidad o conectados a un contenedor en tierra a través de una manguera de suministro.
3. Formato de pulverización: para poderlo expulsar, el material arcilloso debe estar en un estado hídrico que permita pulverizarlo (viscoso). Por tanto, tal como se vio en pruebas anteriores, la máquina debe ser capaz de expulsar materia con una granulometría determinada, con granos que no superen 1,5 mm de diámetro, es decir, entre arcilla, limo y arena fina. También se podría adaptar el tamaño (diámetro) y la forma de la salida o “boquilla”. Así pues, se propuso una serie de “boquillas” de fabricación propia, cada una para un uso concreto, que se podían cambiar en función del diseño y del recorrido del robot, y que se podían mejorar y adaptar según las formas y las estructuras.
4. El dispositivo que lleva a cabo el aporte suele ser una extensión del brazo robotizado formada por un efector Wagner Flexio Spray o un pulverizador de mortero (máquina de arena gruesa), o en el caso de drones, un pulverizador de fabricación propia o un Wagner Flexio Sprayer.

Cada caso de estudio presenta herramientas roboti-

zadas únicas especiales para el aporte por brazo robotizado o por dron volador. Entre estas herramientas están la extensión robotizada, el contenedor de material, el transporte de material, el formato de pulverización y el tipo de dispositivo de aporte, que se indicará detalladamente en cada caso de estudio.

### 2.3 Acciones robotizadas para la pulverización con arcilla

Las acciones robotizadas deben calibrarse con detenimiento para que encajen bien en una determinada secuencia de aplicación. Las primeras pruebas ayudaron a configurar los experimentos de pulverización robotizada modificando el tipo de trayectoria que sigue la herramienta y asociando una velocidad a un determinado tipo de trayectoria. Por ejemplo, las líneas circulares horizontales deben realizarse a una velocidad de 0,5 m/s para lograr una buena adhesión de la materia al soporte. Además, el dispositivo de aporte debe tener un interruptor de encendido y apagado que pueda accionar el brazo robotizado o el piloto o copiloto en los experimentos con drones.

1. La distancia ideal entre la superficie y la boquilla o el final de la manguera del dron es de entre 5 y 45 cm.
2. El caudal de materia debería estar entre los 2 y los 9 l por minuto.
3. La velocidad ideal del brazo robotizado o del dron debería estar entre 0,5 y 1 cm por segundo.
4. Tipos de trayectorias descritas: las trayectorias circulares son adecuadas para secuencias de pulverización iniciales que vayan desde las capas inferiores hasta las capas superiores. Los aportes verticales siempre deben ir desde la base hasta la parte superior a una velocidad mínima de 0,5 cm por segundo, mientras que en mezclas más densas que puedan contener fibras hay que realizar desplazamientos horizontales a una velocidad mínima de 1 cm por segundo.

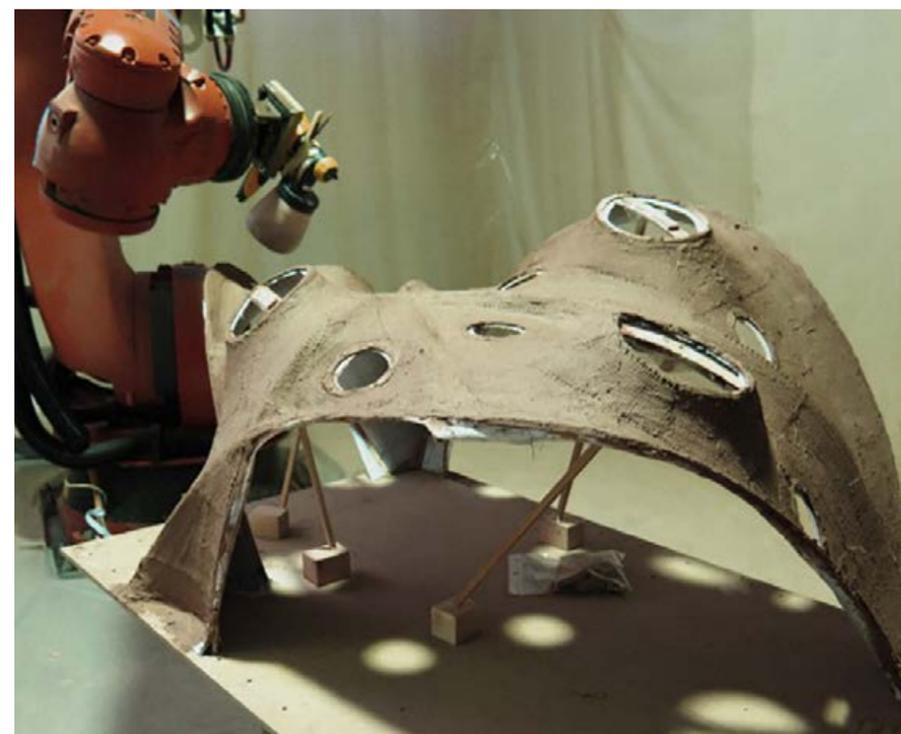
Estos parámetros clave se determinaron tras varias pruebas y sucesivos ajustes minuciosos para aprovechar la capacidad de aporte del dispositivo robótico, que se indicará en cada caso de estudio.

3

## CASOS DE ESTUDIO DE FABRICACIÓN ROBOTIZADA DE ESTRUCTURAS MONOLÍTICAS DE BARRO

La metodología propuesta pretende describir la formulación del material, las herramientas y equipos robóticos y las estrategias de aporte de las técnicas de pulverización robótica de mezclas de arcilla.

Dos casos de estudio de métodos de fabricación de estructuras monolíticas de barro presentan dos técnicas de fabricación robotizada distintas, lo que confirma la validez del proceso y permite calibrar las herramientas de pulverización con distintos tipos de mezclas de arcilla. El primer caso de estudio utiliza un brazo robotizado Kuka de 6 ejes que tiene acoplado un pulverizador de pintura gruesa para aplicar varias capas de mezclas de arcilla sobre un encofra-



↑ Fig. 3. Pulverizador manual de mortero tradicional acoplado al brazo robotizado Kuka. Ángulo medio respecto de la superficie, 45°.  
 ← Fig. 4. Brazo robotizado Kuka de seis grados de libertad de movimiento y 100 kg de capacidad de carga aplicando la mezcla de arcilla inicial.

	Capa 1: capa de contacto o barbotina	Capas 2, 3 y 4	Capas 5, 6 y 7	Capas 8, 9 y 10	Estabilizadores
Composición del material (tipo, granulometría, proporción ingredientes)	1 U arcilla + 2 U agua	1 U arcilla + 1 U agua + 1 U arena dura (3 mm)	1 U arcilla + 1 U agua + +1 U arena dura (4 mm)	Arena de granulometría homogénea (5 mm).	1 U arcilla + 1 U agua + 1 U arena dura (2 mm) + 2 U estabilizadores
Dispositivo de aporte	Brazo robotizado con efector en el extremo (Wagner Flexio Spray)	Brazo robotizado con efector en el extremo. Pulverizador de mortero (máquina de arena gruesa)	Brazo robotizado con efector en el extremo. Pulverizador de mortero (máquina de arena gruesa)	Brazo robotizado con efector en el extremo. Pulverizador de mortero (máquina de arena gruesa)	Brazo robotizado con efector en el extremo (Wagner Flexio Spray)
Distancia ideal entre la superficie y la boquilla	45 cm	35 cm	35 cm	35 cm	45 cm
Caudal de materia	2 l/min	3 l/min	3 l/min	3 l/min	2 l/min
Caudal de aire	100 l/min	156 l/min	156 l/min	156 l/min	156 l/min
Velocidad ideal del brazo robotizado	0,5 cm/s	1 cm/s	1 cm/s	1 cm/s	0,5 cm/s
Tipos de trayectorias descritas	De arriba abajo	Círculos horizontales	De arriba abajo	Círculos horizontales	De arriba abajo



↑ **Tabla 1.** CS1: parámetros de aporte de materia.

← **Fig. 5.** El dron lleva acoplados dos tipos de dispositivos pulverizadores en su parte inferior. Izquierda: proyecta una mezcla líquida de arcilla. Derecha: proyecta una mezcla seca de arena y fibras.

↙ **Fig. 6.** Dron realizando el aporte de mezcla de arcilla con un alto porcentaje de yeso para formar la segunda costra.

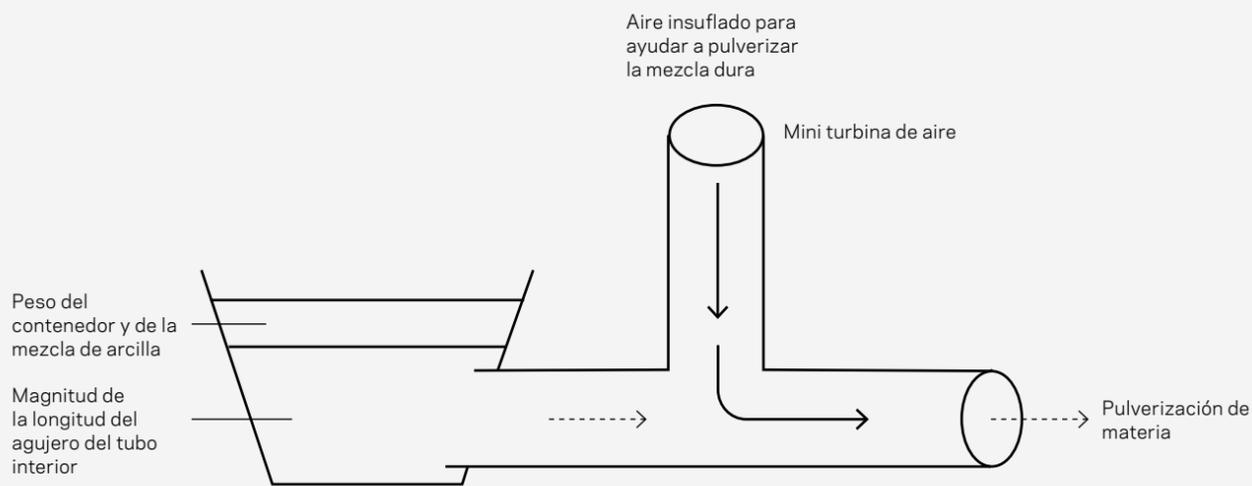
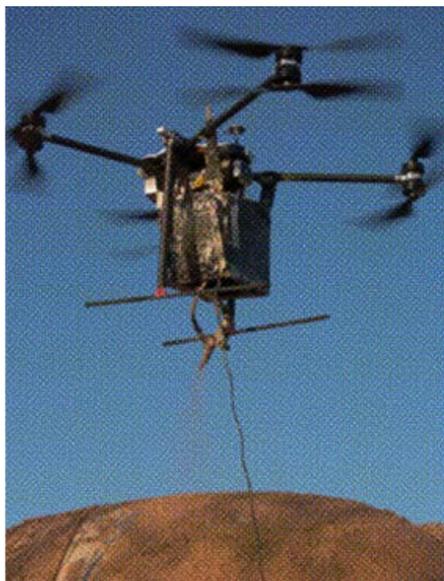


	Fase 1: materia líquida	Fase 2: materia fibrosa	Fase 3: materia viscosa
Composición del material	2 U agua + 1 U arcilla	1 U fibras + 1 U granos	2 U arcilla + 2 U fibras de 3 cm + 1 U agua
Dispositivo de aporte	Wagner Flexio Sprayer	Máquina de fabricación propia (Fig. 7).	Pulverizador de fabricación propia
Distancia de seguridad entre la superficie y el dron (fin de manguera)	10 cm	5 cm	10 cm
Caudal de materia	5 l/min.	9 l/min.	2 l/min.
Caudal de aire (3 bar)	156 l/min	156 l/min	156 l/min
Velocidad del dron	25 km/h	30 km/h	Entre 10 y 20 km/h
Tipos de trayectorias descritas	De abajo arriba	Desde arriba	De abajo arriba

↑ **Tabla 2.** CS2: parámetros de aporte de materia mediante drones

← **Fig. 8.** Aplicación de la capa líquida de arcilla inicial mediante un dispositivo de fabricación propia colocado debajo del dron.

↓ **Fig. 7.** Diagrama del dispositivo de fabricación propia en el que se dirige el flujo de aire hacia la manguera de material antes de su expulsión.



do temporal de tela. El segundo caso de estudio aprovecha la última tecnología en drones y, con la ayuda de un piloto profesional, transporta un contenedor y aporta capas de distintas mezclas de arcilla sobre un encofrado hinchable. De ese modo pone remedio a los puntos débiles del caso de estudio 1: limitaciones en el alcance y uso de equipos pesados que hay que llevar hasta el lugar de realización del trabajo. Para cada caso de estudio se analizará el funcionamiento de la herramienta con la materia y se indicará el nivel necesario de adhesión de la materia a la superficie de soporte para lograr un grosor uniforme y la secuencia de aporte de materia.

### 3.1 Caso de estudio 1.

#### CS1. Pulverización de mezclas de arcilla mediante brazo robotizado

Nombre: Pulverización de mezclas de arcilla mediante brazo robotizado.

Fecha: Noviembre - Diciembre de 2017.

Participantes: Autores, 25 estudiantes de máster de primer curso (cinco grupos de 5 estudiantes cada uno).

Ubicación: Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC), Barcelona (España).

Equipo: Brazo robotizado industrial Kuka; pulverizador de pintura gruesa Wagner; pulverizador manual de mortero tradicional.

Objetivo: Construir una estructura monolítica de barro que quepa en un espacio de un metro cúbico. En una semana se construyeron un total de cinco estructuras.

Este experimento utiliza un brazo robotizado que, con el uso únicamente de la última articulación (Ar6) del efector del robot (Fig. 4), ofrece 6 niveles de libertad. Al brazo robotizado primero se le acopla un pulverizador Wagner Flexio y luego un pulverizador manual de mortero tradicional para realizar el aporte de mezclas más viscosas y con mayor contenido de fibra (Fig. 5). Otras articulaciones predeterminadas permiten que las trayectorias del Ar6 eviten ciertas “singularidades”, es decir, errores en la programación del robot que llevan a acciones que no se pueden ejecutar. Un ejemplo sería que una parte del brazo robotizado chocara con otra parte del mismo. La programación se realiza con el software libre Kuka Prc, y las acciones se pueden crear con definiciones 3D de Grasshoper para Rhino.

La Tabla 1 muestra la sucesión de mezclas de arcilla que se pulverizaron siguiendo una estricta secuencia de aporte. Se probaron varios estabilizadores, que mayoritariamente eran materiales altamente viscosos como gel o jabón líquido. Entre ellos había una solución impermeable tradicional obtenida a partir de cactus que se pulverizó con éxito a un caudal elevado de materia sin que se atascara el pulverizador.

Este caso de estudio demuestra que la técnica permite una buena adhesión entre la materia y la superficie si el conjunto herramienta/materia está correctamente calibrado. En el futuro se podrán introducir mejoras probando estabilizadores locales como posibles ingredientes y creando protocolos de aplicación sobre el terreno para pulverizar los estabilizadores por medios robotizados y crear así una capa de recubrimiento homogénea.

### 3.2 Caso de estudio 2.

#### CS2. Pulverización de mezclas de arcilla mediante drones

CS2 fase 1

Nombre: Pulverización de mezclas de arcilla mediante drones separando la materia seca de la húmeda..

Fecha: Noviembre - Diciembre de 2017.

Participantes: Anónimos, con la empresa RC Take Off.

Ubicación: Lovaina, Bélgica.

Equipo: Dron hecho a medida (por la UCL de Lovaina y RC Take Off), de 2 m de ancho, 8 kg de peso y capacidad de carga de 25 kg, con 15 min de autonomía de vuelo.

CS2 fase 2

Nom: Pulverización de mezclas de arcilla mediante drones separando la materia seca de la húmeda.

Data: Enero de 2018.

Autores: Autores, especialista de arquitectura con tierra cruda, diseñador de drones.

Ubicació: Barcelona Drone Center, Moia.

Equip: Cajas de fabricación propia de materia pastosa para pulverización y aporte.

Estos dos grupos de experimentos exploraron la viabilidad de utilizar drones personalizados para pulverizar distintas mezclas de arcilla. Prestaron gran atención a la separación de la materia seca de la húmeda (Fig. 5) para evitar atascos y para minimizar el peso que transporta el dron en cada viaje. Cuando está mojado, la temperatura del material en todas sus partes membranosas, a ser posible, debería mantenerse homogénea entre los 10 y los 20 grados Celsius. Anteriores experimentos demostraron que cada capa debería calentarse al menos hasta 45 grados Celsius antes de aplicar la siguiente capa de recubrimiento. Futuros experimentos se diseñarán de modo que los sensores del dron puedan tomar la temperatura en varias zonas de la estructura.

La Tabla 2 muestra las distintas mezclas de arcilla y los parámetros que llevan asociados. En ambos casos de estudio, la sucesión de mezclas de arcilla hace que las capas superiores contengan granos de mayor diámetro que los de las capas inferiores.

Durante la realización de los vuelos se observó que el piloto podía acercarse mucho más a la estructura –porque corría menos peligro de chocar y tenía más estabilidad– cuando pulverizaba materia ligera (como fibras y granos) que cuando transportaba líquidos más pesados o mezclas más viscosas (Fig. 9).

Durante este experimento se constató que la capa inicial de mezcla de arcilla debería contener un elevado porcentaje de yeso para lograr rápidamente una sólida y fina costra, de modo que el encofrado hinchable ya no fuera el único elemento que sustenta la construcción y, por consiguiente, se pudiera dejar de insuflar aire (Fig. 6). Aunque este sistema no necesita una gran precisión en la distancia y el ángulo respecto de la superficie, el tiempo parece ser un factor clave para que los distintos materiales se fusionen en una estructura común. Por ejemplo, la materia seca debe ser proyectada sobre una capa húmeda y viscosa a la presión adecuada y a la velocidad correcta (0,5 cm/s) para adherirse a la superficie sin rebotar (Fig. 9).



Fig. 9. Ampliación de las capas viscosas intermedias que el dron proyecta sobre la superficie.

4

#### FUTURA CALIBRACIÓN DE BIOSHOTCRETE

Los materiales tradicionales de construcción como la arcilla son un campo emergente que brinda la oportunidad de entrar en las tradiciones culturales y constructivas combinando lo antiguo y lo nuevo. Las novedosas acciones robotizadas que de todo ello se derivan hacen emerger nuevos procesos de construcción. Los métodos de fabricación robotizada que utilizan la pulverización de arcilla en encofrados ligeros abren una amplia gama de posibilidades y oportunidades para el sector de la construcción. Las acciones robotizadas pueden eliminar la dificultad que comportan las tareas manuales más laboriosas (como llegar a zonas elevadas o montar andamios). Como consecuencia, aumenta la eficiencia en el uso de materiales y se pueden incluir funciones personalizadas en la secuencia de construcción.

Aunque se trata de un trabajo que está en su fase inicial, la calibración iterativa entre los parámetros de pulverización robotizada y la secuencia de aporte para lograr un recubrimiento homogéneo que forma parte de las dos técnicas ayuda a centrar, especular y reflexionar sobre el futuro de la construcción.

El estudio se propone identificar los retos actuales en el ámbito de la construcción robótica y con drones: formulación adecuada de materiales, secuencia de aplicación correcta, avances en estrategias de robótica y en el desarrollo de acciones robotizadas personalizadas.

Las acciones repetitivas y exactas que la robótica introduce con bioshotcrete permiten utilizar nuevos biomateriales con un rendimiento estructural reforzado y mayor inercia, entre otras cualidades. Por ejemplo, determinados tipos de estabilizadores locales pueden ayudar a impermeabilizar la estructura, y se pueden integrar resinas si se vierten en estado líquido a la temperatura adecuada. La formulación de materiales y las secuencias de aplicación han demostrado su viabilidad utilizando un brazo robotizado con tres fases: fase 1 - materia viscosa; fases 2-10 - arcilla con arena (de 3 a 5 mm); y la última capa - estabilizadores. La secuencia

se repitió con el uso de drones, pero hubo que ajustarla en función del viento (el viento natural y el viento provocado por las hélices del dron). En este caso se podía aplicar materia altamente viscosa y de endurecimiento rápido como el mortero de yeso. En futuras pruebas a gran escala, se debería valorar el tamaño máximo que pueden tener los granos de las capas superiores para que la estructura tenga mayor resistencia sin perder estabilidad si se aplica demasiado peso en ciertas zonas. Por otra parte, la arquitectura tradicional con tierra cruda muestra ingredientes invisibles que están presentes en las mezclas de arcilla y que incluyen minerales y gases sulfurados (como la mica, el cuarzo y el feldespato), que se deben analizar más detalladamente, remover adecuadamente en la mezcla y ajustar para encajar en la técnica en futuras pruebas.

Si hablamos de herramientas robotizadas y de acciones robotizadas personalizadas, el uso de un brazo robotizado en CS1 resultó eficaz por la linealidad y la facilidad del proceso, la exactitud de los aportes de pulverización y por la posibilidad de utilizar el método de fabricación sustractiva, pero mostró ciertas limitaciones como, por ejemplo, el alcance del brazo, el coste y tamaño del equipo y la dificultad de transporte de esos dispositivos tan pesados a lugares remotos. Además, las acciones robotizadas necesitan una trayectoria exacta marcada por un programa de CAD como Rhino 3D, por lo que es necesario un escaneado 3D inicial del encofrado temporal. Sin embargo, el dron de pulverización pilotado de CS2 no requiere este escaneado en 3D. Así pues, futuras pruebas deberán mejorar la estrategia de pulverización con drones, apuntando a un nivel superior de automatización que podría permitir al piloto del dron variar la presión y controlar remotamente el ángulo de aporte, permitiendo así que ciertas tareas manuales pasen a ser robotizadas. Si se conectara el dron a la manguera de un pulverizador de mortero (Fig. 10) este tendría suministro constante de material y podría aumentar el caudal de material y la adhesión del material a la superficie en la fabricación futura de estructuras de barro.

CS2 destacó que, si bien este proyecto actualmente se centra en el uso de drones para realizar el aporte de

materia, otros trabajos laboriosos como excavar, cribar, mezclar o transportar podrían resultar más sencillos con el uso de pequeños dispositivos robotizados.

La precisión y el tiempo de secado entre capas representaron un desafío. Próximamente se podría integrar en la inteligencia artificial existente utilizando drones de supervisión que pasarían la información a los drones que llevarían a cabo las acciones. Los vuelos pilotados capaces de modificar la configuración automáticamente son fundamentales para integrar esta técnica en la cadena de construcción. El proceso requiere que cada capa esté lo suficientemente seca antes de aplicar la siguiente capa, por lo que emplazamientos con un clima cálido y seco permiten acelerar la construcción. Sin embargo, bioshotcrete también se puede aplicar en regiones frías y húmedas si se acelera el tiempo de secado aprovechando el viento producido por los drones y creando sistemas que ayuden a alcanzar la temperatura adecuada para cada capa.

Además de los dos casos de estudio que presenta este artículo, pruebas realizadas en el Institute of Making de Londres indicaron que las trayectorias que siguen los drones al pulverizar se pueden codificar, y se pueden definir y redefinir sus parámetros, como la distancia ideal respecto de la superficie, los ángulos de pulverización y la velocidad, que se pueden incluir en el código para que la inteligencia artificial pueda mejorar la técnica vuelo tras vuelo. Por ejemplo, el sistema puede detectar una grieta y transmitir la información al dron pulverizador para que se pare o para que repare la grieta en cuanto la detecte. Una mayor libertad en el aporte de materia permitiría utilizar la tecnología para supervisar la estructura que se está creando, y de ese modo se podría controlar y modificar el grosor en posteriores pruebas.

Aunque esta investigación explora la viabilidad, la importancia y la exactitud del aporte de la pulverización en estructuras de arcilla utilizando drones para aportar material, nuevos experimentos deberán estudiar la calibración adecuada de las herramientas y las posibilidades que ofrecen



Fig. 10. Manguera del pulverizador de mortero grueso conectada al dron para disponer de suministro de material constante.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores han podido llevar a cabo los dos casos de estudio presentados en este artículo gracias a Pierre Lattour y Sebastien Goessens del Departamento de Ingeniería de la UCL de Lovaina y a la colaboración con la empresa de drones RC Take Off. Este proyecto ha recibido una beca "Marie Skłodowska-Curie Actions" de InnoChain: 642877 Horizon2020.

#### REFERENCIAS

- Augugliaro, F., S. Luashin, M. Hamer, C. Male, M. Hehn, M.W. Mueller, J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler, y R. D'Andrea. 2014. "The Flight Assembled Architecture Installation: Cooperative Construction With Flying Machines". *IEEE Control Systems Magazine* 34 (4): 46 -64.
- Block, P., M. Dejong, L. Davis, y J. Ochsendorf. 2010. "Tile Vaulted Systems for Low-cost Construction in Africa". *Journal of the African Technology Development Forum (ATDF) - Special Issue on Architecture for Development* 7: 4-13.
- Bravo, M., y S. Chaltiel. "Paste Matter 3D Printing In Monolithic Shells Fabrication Methods". En *Kine[SIS]tem From Nature to Architectural Matter: Conference Proceedings*, editado por Maria Joao de Oliveira i Filipa Crespo Osório, 10-18. Lisboa: DINÂMIA'CET-IUL, ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa.
- Burry, J., y M. Burry. *The New Mathematics of Architecture*. London: Thames & Hudson, 2010.
- DBFL TU Braunschweig. 2018. "Shotcrete 3D Printing". YouTube video, 1:10. February 13 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=ctKbGHPAzo>
- Felbrich, B., N. Fruch, M. Prado, S. Saffarian, J. Solly, L. Vasey, J. Knippers, A. Menges. 2017. "Multi-Machine Fabrication: An Integrative Design Process Utilising an Autonomous UAV and Industrial Robots for the Fabrication of Long-Span Composite Structures". En *ACADIA 2017: Disciplines & Disruption: Proceedings Catalog of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, editado por Takehiko Nagakura, Skylar Tibbits, Mariana Ibañez, i Caitlin Mueller, 248-259. Dover: Acadia Publishing Company.
- Guillaud, H., y H. Houben. 2015. *CRATerre: traité de construction en terre* 4a ed. Marseille: Editions Parenthèses.
- Ramage, M., J. Ochsendorf, P. Rich, J. Bellamy, y P. Block. 2010. "Design and Construction of the Mapungubwe National Park Interpretive Centre, South Africa". *Journal of the African Technology Development Forum* 2010 (ATDF) 7(1): 14-23.