

# Calibratge robotitzat de la matèria per a *bioshotcrete*

Les tècniques de construcció associades a l'arquitectura tradicional amb terra es caracteritzen per recórrer a tasques manuals laborioses en què se succeeixen diverses capes de barreja d'argila sobre un encofrat lleuger, com en el cas de la tècnica dels bajareques. Hi ha solucions més sostenibles per utilitzar el ciment, com ara la projecció de materials (shotcrete) o la polvorització de ciment sobre encofrats de roba lleugers, inflables o de malles metàl·liques. Aquest estudi explora les tècniques robotitzades de fabricació digital d'estructures monolítiques de fang. L'objectiu és reformular l'ús de l'argila com a material sostenible per no recórrer tant a tasques laborioses, minimitzar l'ús d'encofrats i implementar processos de fabricació robotitzada. Aquesta nova tècnica rep el nom de *bioshotcrete* i es caracteritza per ser un procés de fabricació innovador d'aportació per polvorització robotitzada seqüencial amb barreges naturals i brutes d'argila sobre un encofrat lleuger temporal. Es descriuen i s'analitzen dos casos d'estudi que mostren dues tècniques diferents: la polvorització de barreges d'argila amb un braç robotitzat i amb drons. Se'n destaquen els detalls i se'n ressalten les consideracions més importants, com ara petits ajustaments en la formulació de materials i en les seqüències d'aplicació, les estratègies d'eines robotitzades i les accions robotitzades personalitzades. Aquesta sèrie d'experiments es va idear com a experiment en evolució per respondre a desafiaments com ara la limitació en la distància d'abast i el pes de les màquines que calia transportar fins a l'emplaçament dels treballadors, i per provar les possibilitats que ofereixen les tècniques acabades de descobrir que utilitzen drons per a l'aportació de material. A cada aplicació de barreja d'argila s'estudiava el funcionament de l'eina amb la matèria (velocitat de polvorització i adhesió a la superfície). Proves recents hi han introduït millores addicionals, com ara l'ús dels corrents d'aire que generen les hèlixs dels drons per ajudar a assecar les diferents capes. Noves conclusions permeten determinar que aquesta tècnica no només està modificant els nous processos de fabricació digital i de disseny, sinó que planteja possibles aplicacions futures i mostra nous escenaris per a embolcalls sostenibles de fang 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

PARAULES CLAU  
Arquitectura de terra, shotcrete, drons, estructures, fabricació digital, construcció robotitzada, braç robotitzat, material digital, calibratge iteratiu.

COM CITAR  
Bravo, Maite, Stephanie Chaltiel i Wilfredo Carazas. 2018. "Calibratge robotitzat de la matèria per a *bioshotcrete*" [Matter-Robotic Calibration for Bioshotcrete]. *Temes de disseny* 34: 78-89.

L'argila s'ha utilitzat des de l'antiguitat com a material de construcció en l'arquitectura vernacle i tradicional. Algunes tècniques, com ara l'ús de bajareques, utilitzen una trama de branques flexibles a tall d'encofrat perdut que es van recobrint per tots dos costats amb diverses capes d'argila (Guillaud, Houben 2015, 345-348). El resultat són uns panells que s'utilitzen per construir blocs o per construir cúpules i voltes monolítiques. Reconsiderar alguns dels principis en què se sustenten aquestes tècniques tradicionals de construcció ofereix un gran potencial: quan es combinen amb els últims protocols de disseny i els mètodes de fabricació més recents revelen un nivell de llibertat inaudit, com ara la construcció de diferents voltes no regulars que funcionen només per compressió (Block et al. 2010, 4-13) i que permeten que textures i gruixos variables obtinguts amb geometries optimitzades utilitzin el mínim de material per aconseguir la màxima resistència (Burry i Burry 2010, 126-130).

Alguns experiments realitzats els últims anys, majoritàriament en entorns acadèmics, proposen reconsiderar l'argila com a material tradicional i estudiar-ne possibles formulacions i aplicacions amb tecnologia robòtica (Fig. 1) que inclouen la fabricació additiva amb dos mètodes d'aportació d'argila: l'extrusió i la polvorització. Els primers experiments van fer palès que l'extrusió requereix més precisió (tolerància d'1 mm) en la distància, la velocitat d'aportació, la mida i la forma dels broquets, mentre que la polvorització admetia un nivell més elevat d'imprecisió (tolerància de fins a 20 cm) en la distància entre el broquet i la superfície (Bravo, Chaltiel 2017, 15-18). Alguns referents en el sector de la construcció inclouen l'ús de la tecnologia de projecció de materials (shotcrete), que presenta diferents nivells d'automatització en la polvorització. Aquesta tecnologia permet controlar diversos aspectes de l'aportació de materials com ara el gruix de la matèria, el flux i les esquerdes, i aquest control el duen a terme professionals de la construcció sobre el terreny. Experiments recents realitzats a la Universitat Tècnica de Brunswick (Alemanya) han explorat el camp de la impressió robòtica en 3D amb polvorització d'aportació per capes, i han aconseguit realitzar models en 3D per mitjà de projecció de materials (shotcrete) sense que calgui utilitzar encofrats (DBFL TU Braunschweig 2018). D'altra banda, en els últims anys s'han estat utilitzant drons en el sector de la construcció, sobretot per escanejar en 3D els emplaçaments de les obres i per donar informació als robots de producció, tal com s'ha vist recentment amb les estructures de fibra de carboni ondulades d'Achim Menges (Felbrich et al. 2018, 248-259). El projecte del 2017 de Carlo Ratti Paint By Drone per pintar per polvorització va utilitzar drons personalitzats. Un altre exemple són els drons teixidors de Gramazio Kohler Research juntament amb el grup del robotista Raffaello D'Andrea de l'Institute for Dynamic Systems and Control d'ETH Zürich, que investiga els aspectes tecnològics de vols preprogramats com a part d'un experiment que utilitza drons per a les tasques que no són de gravació. La investigació es va centrar en la interacció concreta eina/matèria que podia donar lloc a determinades formes arquitectòniques,

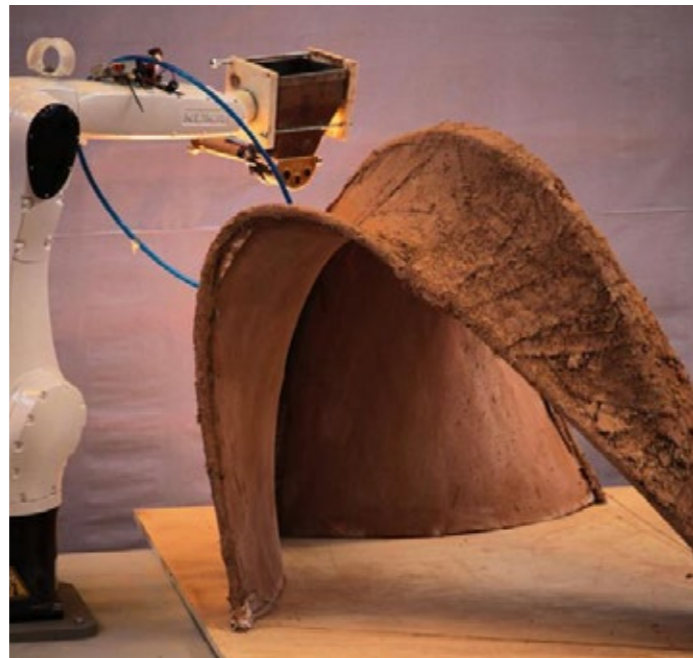


Fig. 1. Taller de Geometria Intel·ligent a Göteborg amb estructures monolítiques fabricades pels autors amb la tècnica de polvorització robotitzada d'argila.

tal com feien palès les parets irregulars de la instal·lació *Remote Material Deposition* (Augugliaro et al. 2014, 46-64) amb el llançament robòtic de petites masses d'argila. Alguns d'aquests recents avenços en tecnologies de fabricació digital estan obrint un fructífer camp d'experimentació amb nous processos de disseny i noves tècniques de construcció, que permeten reproduir estructures irregulars i optimitzar el gruix de les estructures de construcció per minimitzar la quantitat de material utilitzat, tal com es va veure al projecte que Philippe Block va desenvolupar a l'Àfrica (Block et al. 2010, 4-13).

Aquesta investigació explora la implementació de tècniques de polvorització de fang en encofrats lleugers per construir estructures monolítiques de fang utilitzant un braç robotitzat o sistemes d'aportació aèria per a la polvorització (com ara drons), i se centra en el calibratge eina/matèria per aconseguir una òptima adhesió a la superfície i la formació d'una crosta uniforme i homogènia.

## 2 L'ORIGEN DEL BIOSHOTCRETE

Un equip pluridisciplinari de dissenyadors, enginyers i experts en robòtica estan desenvolupant una nova tècnica anomenada *bioshotcrete*. Volen crear una nova versió més sostenible de l'actual projecció de materials (shotcrete) utilitzant pasta no tòxica com a matèria en lloc de ciment, equips més petits i un encofrat fàcil de muntar format per fibres tèxtils naturals com ara el jute (Chaltiel i Bravo 2017, 94-97). Per crear-lo cal seguir amb exactitud un procés de minuciosa formulació de diverses capes d'argila que s'han d'aplicar en la seqüència correcta (Chaltiel i Bravo 2017, 94-97). L'objectiu és aconseguir que la matèria s'adhereixi a la superfície i controlar millor els gruixos finals que s'utilitzen per construir carcasses i cúpules de fang monolítiques de

grans dimensions en tot just uns dies. L'origen del *bioshotcrete* s'ha de buscar en la formulació d'un material i d'una seqüència d'aplicació adequats, en els avenços en les estratègies de robotització i en el desenvolupament d'accions robotitzades personalitzades.

### 2.1 Formulació de materials pastosos per a la fabricació additiva

L'argila presenta clars avantatges com a material de construcció, ja que té beneficis mediambientals perquè és un recurs natural amb una gran disponibilitat, una baixa entropia i una elevada inèrcia. Aquest estudi proposa un protocol per a l'aportació robotitzada seqüencial de barreges d'argila modificant la proporció de cada ingredient de la barreja. D'aquesta manera s'aconseguiran diferents nivells de consistència, viscositat, elasticitat i enfigassament, entre altres aspectes. A més, la fabricació robotitzada utilitzant barreges d'argila requereix una formulació exacta dels materials per aconseguir que la crosta sòlida s'adhereixi bé a la capa anterior o a la superfície inicial. Per tant, cada capa d'aportació té una composició diferent en què els grans, les fibres, la densitat i la proporció d'aigua o d'argila que actua com a aglutinant poden variar enormement (Fig. 2).

S'han formulat i provat tres tipus de barreges d'argila:

1. La capa líquida per a la polvorització inicial anomenada barbotina forma una fina crosta sòlida i homogènia que substitueix l'encofrat lleuger inicial. Aquesta capa fa que l'adhesió de les capes posteriors augmenti i permet treure fàcilment la roba d'encofrat lleuger temporal quan finalitza el procés.
2. Les capes intermèdies que contenen aigua i sorres tenen un elevat contingut de fibres, que ajuden a donar gruix sense sobrecarregar el delicat encofrat, i a absorbir l'excés d'humitat. Aquestes capes gruixudes proporcionen una elevada inèrcia.
3. Els revestiments superiors contenen estabilitzants naturals com ara calç que, quan encara està calenta, es combina amb greix animal, argila i sorres de grans d'un diàmetre més gran que en capes anteriors.

Algunes estructures d'entre 1 i 3 m d'alçada es van construir polvoritzant fang amb robots sobre robes tibades seguint una formulació concreta de les capes de material (Fig. 2) que inclou una composició amb les següents granulometria i proporció d'ingredients:

- a- Capa de contacte o barbotina: formada per argila en pols amb un diàmetre de gra inferior a 1 mm. 1 unitat (U) d'argila per 2 U d'aigua;
- b- Reforços de roba porosos amb diferents densitats de malla (com ara el jute) amb una densitat mínima d'1 cm i que s'apliquen a mà;
- c- Capes 2, 3 i 4: 1 U argila + 1 U sorra dura [2 mm de diàmetre] + 1 U aigua;
- d- Capes 5, 6 i 7: 1 U argila + 1 U sorra dura [4 mm de diàmetre] + 1 U aigua;
- e- Capa de roba de reforç amb una densitat de malla mínima de 0,5 cm. S'aplica a mà;
- f- Capes 8, 9 i 10: 1 U argila + 1 U sorra dura [5 mm de diàmetre] + 1 U aigua. Es poden afegir diferents tipus d'estabilitzants a la barreja d'argila de les capes superiors per impermeabilitzar-les i per evitar la formació d'esquerdes.

*Es van formular i es van aplicar diverses barreges en els casos d'estudi. De totes, se'n compararan els paràmetres que determinen la bona adherència del material d'aportació a la superfície de l'encofrat. D'altra banda, es descriuran més detalladament aspectes com ara la composició i la seqüenciació. Aquesta descripció inclourà la seqüència d'aplicació per fases, així com la composició del material: tipus d'ingredients, granulometria, proporcions de cada material, temps d'assecat i ús d'estabilitzants.*

### 2.2 Estratègies de robotització

Les eines robotitzades personalitzades per polvoritzar diferents tipus de barreges d'argila en encofrats lleugers han demostrat la seva utilitat, ja que eliminen l'ús de complexes bastimentades. Així i tot, tenen certes limitacions, com ara l'abast dels braços en estructures de grans dimensions. D'aquí que es plantegin alternatives com ara

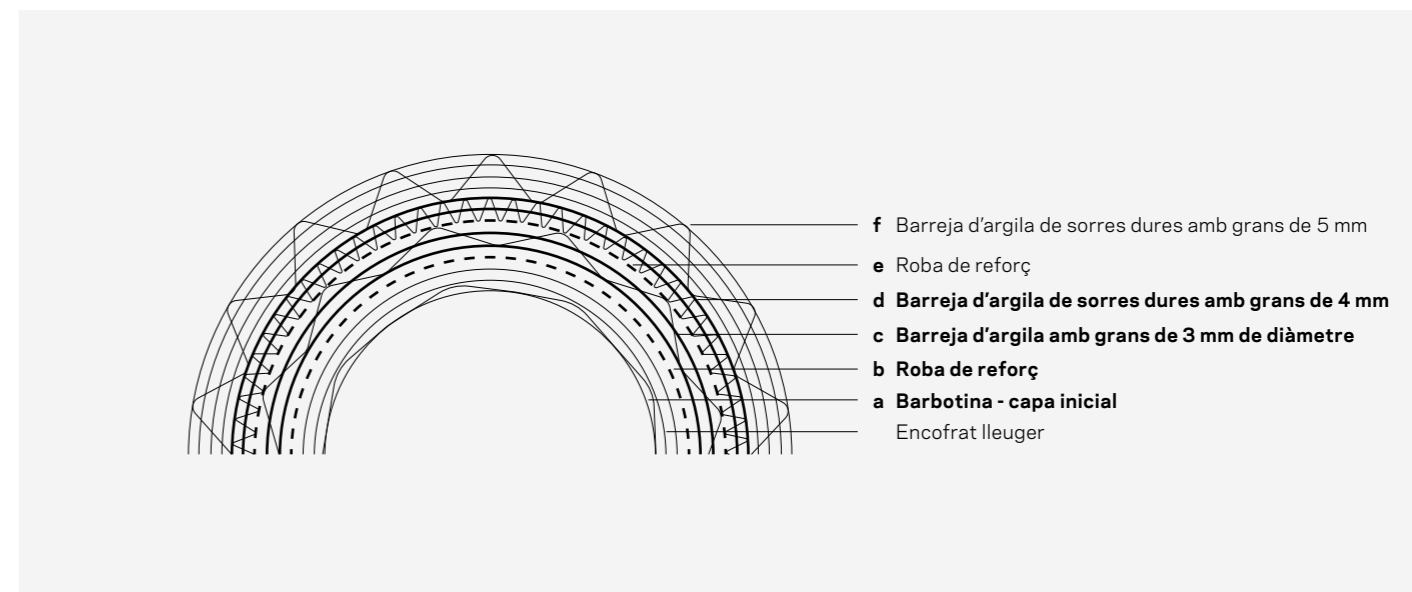


Fig. 2: Diagrama que mostra la successió de capes d'argila que cal aplicar en un encofrat lleuger temporal.



l'aportació aèria. Aquestes primeres iniciatives demostren que la pràctica de polvoritzar barreges d'argila amb prou feines s'han explorat, i aquesta investigació vol proposar una seqüència de construcció robotitzada per a barreges d'argila utilitzant braços robotitzats i drons. En el procés, en què intervenen el polvoritzador, el contenidor del material i l'emplenament continuat de l'aparell fins que s'aconsegueix una estructura que s'aguanta per si sola, s'han d'integrar de forma coordinada la matèria i les accions robotitzades.

1. Contenedor del material: la primera part del procés de fabricació comença amb la barreja de l'argila utilitzant eines del sector de la construcció (mescladores horitzontals o giratòries). Un cop feta, la barreja s'ha de col·locar en un contenidor, on s'ha de remenar contínuament, tal com ja s'havia fet prèviament en altres casos, perquè l'argila és un material granulat i tendeix a enganxar-se a les parets del contenidor i a deixar un "broquet" amb cantells irregulars i no homogenis que provoca diferències en el revestiment.

2. Transport del material: per a l'aportació de material s'han explorat mecanismes d'emplenament amb diverses modalitats:

1. Braç robotitzat amb polvoritzador manual de morter que pot contenir fins a 8 l de barreja i que es pot connectar a un compressor d'aire a terra per mitjà d'una mànega.

2. Aportació de matèria amb drons equipats amb contenidors d'entre 5 i 35 kg de capacitat o connectats a un contenidor a terra per mitjà d'una mànega de subministrament.

3. Format de polvorització: perquè pugui ser expulsat, el material argilós ha d'estar en un estat hídric que permeti polvoritzar-lo (viscós). Per tant, tal com es va veure en proves anteriors, la màquina ha de ser capaç d'expulsar matèria amb una granulometria determinada, amb grans que no superin els 1,5 mm de diàmetre, és a dir, entre argila, llim i sorra fina. També es podrien adaptar la mida (diàmetre) i la forma de la sortida o "broquet". Així doncs, es va proposar una sèrie de "broquets" de fabricació pròpia, cadascun per a un ús concret, que es podien canviar segons el disseny i el recorregut del robot, i que es podien millorar i adaptar segons les formes i les estructures.

4. El dispositiu que duu a terme l'aportació sol ser una extensió del braç robotitzat formada per un efector Wagner Flexio Spray o un polvoritzador de morter (màquina de sorra gruixuda), o en el cas dels drons, un polvoritzador de fabricació pròpia o un Wagner Flexio Sprayer.

Cada cas d'estudi presenta eines robotitzades úniques especials per a l'aportació per braç robotitzat o per dron volador. Entre aquestes eines hi ha l'extensió robotitzada, el contenidor de material, el transport de material, el format de polvorització i el tipus de dispositiu d'aportació, que s'indicarà detalladament en cada cas d'estudi.

### 2.3 Accions robotitzades per a la polvorització amb argila

Les accions robotitzades s'han de calibrar amb minuciositat perquè encaixin bé en una determinada seqüència d'aplicació. Les primeres proves van ajudar a configurar els experiments de polvorització robotitzada modificant el tipus de trajectòria que segueix l'eina i associant una velocitat a un determinat tipus de trajectòria. Per exemple, les línies circulars horitzontals s'han de fer a una velocitat de 0,5 m/s per aconseguir una bona adhesió de la matèria al suport. A més, el dispositiu d'aportació ha de tenir un interruptor d'encesa i apagada que pugui accionar el braç robotitzat o el pilot o copilot en els experiments amb drons.

1. La distància ideal entre la superfície i el broquet o el final de la mànega del dron és d'entre 5 i 45 cm.
2. El cabal de matèria hauria d'estar entre els 2 i els 9 l per minut.
3. La velocitat ideal del braç robotitzat o del dron hauria d'estar entre 0,5 i 1 cm per segon.
4. Tipus de trajectòries descrites: les trajectòries circulars són adequades per a seqüències de polvorització inicials que vagin des de les capes inferiors fins a les capes superiors. Les aportacions sempre han d'anar des de la base fins a la part superior a una velocitat mínima de 0,5 cm per segon, mentre que en barreges més denses que puguin contenir fibres cal fer desplaçaments horitzontals a una velocitat mínima d'1 cm per segon.

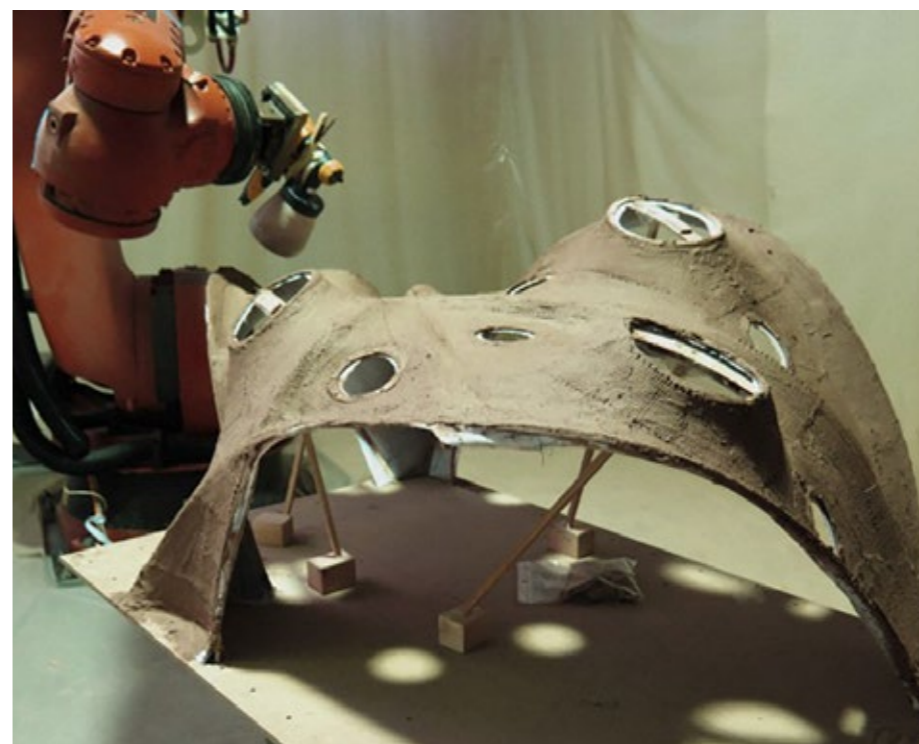
Aquests paràmetres clau es van determinar després de diverses proves i de successius ajustaments minuciosos per aprofitar la capacitat d'aportació del dispositiu robòtic, que s'indicarà en cada cas d'estudi.

3

### CASOS D'ESTUDI DE FABRICACIÓ ROBOTITZADA D'ESTRUCTURES MONOLÍTIQUES DE FANG

La metodologia proposada vol descriure la formulació del material, les eines i els equips robòtics i les estratègies d'aportació de les tècniques de polvorització robòtica de barreges d'argila.

Dos casos d'estudi de mètodes de fabricació d'estructures monolítiques de fang presenten dues tècniques de fabricació robotitzada diferents, un fet que confirma la validesa del procés i permet calibrar les eines de polvorització amb diferents tipus de barreges d'argila. El primer cas d'estudi utilitza un braç robotitzat Kuka de 6 eixos que té acoblat un polvoritzador de pintura gruixuda per aplicar unes quantes capes de barreges d'argila sobre un encofrat temporal de roba. El segon cas d'estudi aprofita l'última tecnologia en drons i, amb l'ajuda d'un pilot professional, transporta un contenidor i aporta capes de diferents barreges d'argila sobre un encofrat inflable. D'aquesta manera posa remei als punts dèbils del cas d'estudi 1: limitacions en l'abast i l'ús d'equips pesats que cal dur fins al lloc de realització de la feina. Per a cada cas d'estudi s'analitzarà el



↑ Fig. 3. Polvoritzador manual de morter tradicional acoblat al braç robotitzat Kuka. Angle mitjà respecte de la superfície, 45°.  
← Fig. 4. Braç robotitzat Kuka amb sis graus de llibertat de moviment i 100 kg de capacitat de càrrega aplicant la barreja d'argila inicial.



	Capa 1: capa de contacte o barbotina	Capes 2, 3 i 4	Capes 5, 6 i 7	Capes 8, 9 i 10	Estabilitzadors
Composició del material (tipus, granulometria, proporció d'ingredients)	1 U argila + 2 U aigua	1 U argila + 1 U aigua + 1 U sorra dura (3 mm)	1 U argila + 1 U aigua + +1 U sorra dura (4 mm)	Sorra de granulometria homogènia (5 mm)	1 U argila + 1 U aigua + 1 U sorra dura (2 mm) + 2 U estabilitzadors
Dispositiu d'aportació	Braç robotitzat amb efector a l'extrem (Wagner Flexio Spray)	Braç robotitzat amb efector a l'extrem. Polvoritzador de morter (màquina sorra gruixuda)	Braç robotitzat amb efector a l'extrem. Polvoritzador de morter (màquina sorra gruixuda)	Braç robotitzat amb efector a l'extrem. Polvoritzador de morter (màquina sorra gruixuda)	Braç robotitzat amb efector a l'extrem (Wagner Flexio Spray)
Distància ideal entre la superfície i el broquet	45 cm	35 cm	35 cm	35 cm	45 cm
Cabal de matèria	2 l/min	3 l/min	3 l/min	3 l/min	2 l/min
Cabal d'aire	100 l/min	156 l/min	156 l/min	156 l/min	156 l/min
Velocitat ideal del braç robotitzat	0,5 cm/s	1 cm/s	1 cm/s	1 cm/s	0,5 cm/s
Tipus de trajectòries descrites	De dalt a baix	Cercles horitzontals	De dalt a baix	Cercles horitzontals	De dalt a baix



↑ Taula 1. CS1: paràmetres d'aportació de matèria.  
 ← Fig. 5. El dron duu acoblats dos tipus de dispositius polvoritzadors a la part inferior. Esquerra: projecta una barreja líquida d'argila. Dreta: projecta una barreja seca de sorra i fibres.  
 ↙ Fig. 6. Dron realitzant l'aportació de barreja d'argila amb un alt percentatge de guix per formar la segona crosta.



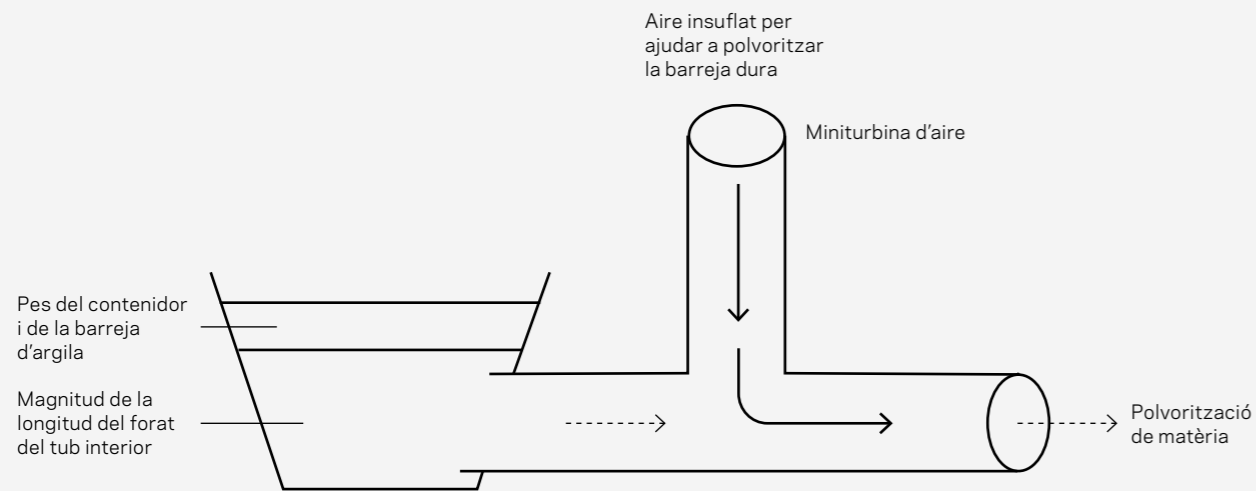


	Fase 1: matèria líquida	Fase 2: matèria fibrosa	Fase 3: matèria viscosa
Composició del material	2 U aigua + 1 U argila	1 U fibres + 1 U grans	2 U argila + 2 U fibres de 3 cm + 1 U aigua
Dispositiu d'aportació	Wagner Flexio Sprayer	Màquina de fabricació pròpia (Fig. 7).	Polvoritzador de fabricació pròpia (Fig. X)
Distància de seguretat entre la superfície i el dron (final de mànega)	10 cm	5 cm	10 cm
Cabal de matèria	5 l/min.	9 l/min.	2 l/min.
Cabal d'aire (3 bar)	156 l/min	156 l/min	156 l/min
Velocitat del dron	25 km/h	30 km/h	Entre 10 i 20 km/h
Tipus de trajectòries descrites	De baix a dalt	Des de dalt	De baix a dalt

↑ Taula 2. CS2: paràmetres d'aportació de matèria per mitjà de drons.

← Fig. 8. Aplicació de la capa líquida d'argila inicial per mitjà d'un dispositiu de fabricació pròpia col·locat sota el dron.

↓ Fig. 7. Diagrama del dispositiu de fabricació pròpia en què es redirigeix el flux d'aire cap a la mànega de material abans d'expulsar-lo.



funcionament de l'eina amb la matèria i s'indicarà el nivell necessari d'adhesió d'aquesta a la superfície de suport per aconseguir un gruix uniforme i la seqüència d'aportació de matèria.

### 3.1 Cas d'estudi 1.

#### CS1. Polvorització de barreges d'argila per mitjà de braç robotitzat

Nom: Polvorització de barreges d'argila per mitjà de braç robotitzat.

Data: Novembre - Desembre de 2017.

Participants: Autors, 25 estudiants de màster de primer curs (cinc grups de 5 estudiants cadascun).

Ubicació: Institut d'Arquitectura Avançada de Catalunya (IAAC), Barcelona (Espanya).

Equip: Braç robotitzat industrial Kuka; polvoritzador de pintura gruixuda Wagner; polvoritzador manual de morter tradicional.

Objectiu: Construir una estructura monolítica de fang que càpiga en un espai d'un metre cúbic. En una setmana es van construir un total de cinc estructures.

Aquest experiment utilitza un braç robotitzat que, només amb l'ús de l'última articulació (Ar6) de l'efector del robot (Fig. 4), ofereix 6 nivells de llibertat. Primer s'acobla al braç robotitzat un polvoritzador Wagner Flexio i després, un polvoritzador manual de morter tradicional per fer l'aportació de barreges més viscoses i amb més contingut de fibra (Fig. 5). Altres articulacions predeterminades permeten que les trajectòries de l'Ar6 evitin certes "singularitats", és a dir, errors en la programació del robot que duen a accions que no es poden executar. Un exemple seria que una part del braç robotitzat topés amb una altra de les seves parts. La programació es realitza amb el software lliure Kuka Prec, i les accions es poden crear amb definicions 3D de Grasshoper per a Rhino.

La Taula 1 mostra la successió de barreges d'argila que es van polvoritzar seguint una estricta seqüència d'aportació. Es van provar diversos estabilitzadors, que majoritàriament eren materials altament viscous com ara el gel o el sabó líquid. Entre aquests hi havia una solució impermeable tradicional obtinguda a partir de cactus que es va polvoritzar amb èxit a un cabal elevat de matèria sense que s'embossés el polvoritzador.

Aquest cas d'estudi demostra que la tècnica permet una bona adhesió entre la matèria i la superfície si el conjunt eina/matèria està correctament calibrat. En el futur es podran introduir millores provant estabilitzadors locals com a possibles ingredients i creant protocols d'aplicació sobre el terreny per polvoritzar els estabilitzadors amb mitjans robotitzats per crear així una capa de revestiment homogènia.

### 3.2 Cas d'estudi 2.

#### CS2. Polvorització de barreges d'argila per mitjà de drons

##### CS2 fase 1

Nom: Polvorització de barreges d'argila per mitjà de drons separant la matèria seca de la humida.

Data: Novembre - Desembre de 2017.

Participants: Anònims, amb l'empresa RC Take Off.

Ubicació: Lovaina, Bèlgica.

Equip: Dron fet a mida (per la UCL de Lovaina i RC Take Off), de 2 m d'amplada, 8 kg de pes i amb una capacitat de càrrega de 25 kg, amb 15 min d'autonomia de vol.

##### CS2 fase 2

Nom: Polvorització de barreges d'argila per mitjà de drons separant la matèria seca de la humida.

Data: Gener de 2018.

Autors: Autors, especialista d'arquitectura amb terra bruta, dissenyador de drons.

Ubicació: Barcelona Drone Center, Moià.

Equip: Caixes de fabricació pròpia de matèria pastosa per a polvorització i aportació.

Aquests dos grups d'experiments van explorar la viabilitat d'utilitzar drons personalitzats per a polvoritzar diferents barreges d'argila. Van prestar una gran atenció a la separació de la matèria seca de la humida (Fig. 5) per evitar embussos i per minimitzar el pes que transporta el dron en cada viatge. Quan està mullat, la temperatura del material en totes les seves parts membranoses, si és possible, s'hauria de mantenir homogènia entre els 10 i els 20 graus Celsius. Anteriors experiments van demostrar que cada capa s'hauria d'escalfar com a mínim fins als 45 graus Celsius abans d'aplicar la següent capa de revestiment. Futurs experiments es dissenyaran de manera que els sensors del dron puguin mesurar la temperatura a diferents zones de l'estructura.

La Taula 2 mostra les diferents barreges d'argila i els paràmetres que duen associats. En tots dos casos d'estudi, la successió de barreges d'argila fa que el diàmetre dels grans que contenen les capes superiors sigui més gran que el dels grans de les capes inferiors.

Durant la realització dels vols es va observar que el pilot podia apropar-se molt més a l'estructura –perquè corria menys perill de topiar i tenia més estabilitat– quan polvoritzava matèria lleugera (com ara fibres i grans) que quan transportava líquids més pesats o barreges més viscous (Fig. 9).

Durant aquest experiment es va constatar que la capa inicial de barreja d'argila hauria de contenir un elevat percentatge de guix per aconseguir ràpidament una sòlida i fina crosta, de manera que l'encofrat inflable ja no fos l'únic element que sustentés la construcció i, per consegüent, s'hi pogués deixar d'insuflar aire (Fig. 6). Tot i que aquest sistema no necessita una gran precisió en la distància i l'angle respecte de la superfície, sembla que el temps és un factor clau perquè els diferents materials es fusionin en una estructura comuna. Per exemple, la matèria seca ha de ser projectada sobre una capa humida i viscosa a la pressió adequada i a la velocitat correcta (0,5 cm/s) perquè s'adhereixi a la superfície sense rebotar-hi (Fig. 9).





Fig. 9. Ampliació de les capes viscoses intermèdies que el dron projecta sobre la superfície.

4

#### FUTUR CALIBRATGE DE BIOSHOTCRETE

Els materials tradicionals de construcció com l'argila són un camp emergent que ofereix l'oportunitat d'entrar en les tradicions culturals i constructives combinant el que és antic i el que és nou. Les noves accions robotitzades que se'n deriven fan emergir nous processos de construcció. Els mètodes de fabricació robotitzada que utilitzen la polvorització d'argila en encofrats lleugers obren una àmplia gamma de possibilitats i oportunitats per al sector de la construcció. Les accions robotitzades poden eliminar la dificultat que comporten les tasques manuals més laborioses (com ara arribar a zones elevades o muntar bastimentades). Com a conseqüència, augmenta l'eficiència en l'ús de materials i es poden incloure funcions personalitzades en la seqüència de construcció.

Encara que es tracti d'una feina que està en la seva fase inicial, el calibratge iteratiu entre els paràmetres de polvorització robotitzat i la seqüència d'aportació per aconseguir un revestiment homogeni que forma part de les dues tècniques ajuda a centrar el futur de la construcció, a especular-hi i a reflexionar-hi.

L'estudi es proposa identificar els reptes actuals en l'àmbit de la construcció robòtica i amb drons: formulació adequada de materials, seqüència d'aplicació correcta, avenços en estratègies de robòtica i en el desenvolupament d'accions robotitzades personalitzades.

Les accions repetitives i exactes que la robòtica introdueix amb *bioshotcrete* permeten utilitzar nous biomaterials amb un rendiment estructural reforçat i amb més inèrcia, entre altres qualitats. Per exemple, alguns tipus d'estabilitzadors locals poden ajudar a impermeabilitzar l'estructura, i s'hi poden integrar resines si s'aboquen en estat líquid a la temperatura adequada. La formulació de materials i les seqüències d'aplicació han demostrat la seva viabilitat utilitzant un braç robotitzat amb tres fases: fase 1 - matèria viscosa; fases 2-10 - argila amb sorra (de 3 a 5 mm); i l'última capa - estabilitzadors. La seqüència es va repetir amb l'ús de

drons, però es va haver d'ajustar en funció del vent (el vent natural i el vent provocat per les hèlixs del dron). En aquest cas es podia aplicar matèria altament viscosa i d'enduriment ràpid com el morter de guix. En futures proves a gran escala, s'hauria de valorar la mida màxima que poden tenir els grans de les capes superiors perquè l'estructura tingui més resistència sense perdre estabilitat si s'aplica massa pes en algunes zones. D'altra banda, l'arquitectura tradicional amb terra bruta mostra ingredients invisibles que estan presents a les barreges i que inclouen minerals i gasos sulfurats (com ara la mica, el quars i el feldespat), que s'han d'analitzar més detalladament, remoure adequadament a la barreja i ajustar perquè encaixin en la tècnica en futures proves.

Si parlem d'eines robotitzades i d'accions robotitzades personalitzades, l'ús d'un braç robotitzat a CSI va resultar eficaç gràcies a la linealitat i la facilitat del procés, l'exactitud de les aportacions de polvorització i a la possibilitat d'utilitzar el mètode de fabricació sostractiva, però va mostrar algunes limitacions com, per exemple, el seu abast, el cost i la mida de l'equip i la dificultat de transportar aquests dispositius tan pesats a llocs remots. A més, les accions robotitzades necessiten una trajectòria exacta marcada per un programa de CAD com Rhino 3D, de manera que és necessari un escanejat 3D inicial de l'encofrat temporal. Tanmateix, el dron de polvorització pilotat de CS2 no necessita aquesta escanejat en 3D. Així doncs, futures proves hauran de millorar l'estratègia de polvorització amb drons i apuntar a un nivell superior d'automatització que podria permetre que el pilot del dron variés la pressió i controlés remotament l'angle de l'aportació. D'aquesta manera seria possible que algunes tasques manuals passessin a ser robotitzades. Si el dron es connectés a la mànega d'un polvoritzador de morter (Fig. 10) aquest tindria subministrament constant de material i podria augmentar el cabal de material i la seva adhesió a la superfície en la fabricació futura d'estructures de fang.

CS2 va destacar que, si bé aquest projecte se centra actualment en l'ús de drons per realitzar l'aportació de matèria, altres feines laborioses com ara excavar, garbellar, barrejar o transportar podrien resultar més senzilles amb l'ús de petits dispositius robotitzats.

La precisió i el temps d'asseccament entre capes van representar un desafiament. Pròximament això es podria integrar en la intel·ligència artificial existent utilitzant drons de supervisió que passarien la informació als drons que encarregats de dur a terme les accions. Els vols pilotats capaços de modificar la configuració automàticament són fonamentals per integrar aquesta tècnica en la cadena de construcció. El procés requereix que cada capa estigui prou seca abans d'aplicar la següent, de manera que emplaçaments amb un clima càlid i sec permeten accelerar la construcció. Malgrat això, *bioshotcrete* també es pot aplicar en regions fredes i humides si s'accelera el temps d'asseccament aprofitant el vent produït pels drons i creant sistemes que ajudin a assolir la temperatura adequada per a cada capa.

A més dels dos casos d'estudi que presenta aquest article, proves realitzades a l'Institute of Making de Londres van indicar que les trajectòries que segueixen els drons quan polvoritzen es poden codificar, i es poden definir i redefinir els seus paràmetres, com ara la distància ideal respecte de la superfície, els angles de polvorització i la velocitat, que es poden incloure en el codi perquè la intel·ligència artificial pugui millorar la tècnica vol rere vol. Per exemple, el sistema pot detectar una esquerda i transmetre la informació al dron polvoritzador perquè s'aturi o perquè repari l'esquerda tan bon punt la detecti. Més llibertat en l'aportació de matèria permetria utilitzar la tecnologia per supervisar l'estructura que s'està creant, i d'aquesta manera es podria controlar i modificar el gruix en proves posteriors.

Tot i que aquesta investigació explora la viabilitat, la importància i l'exactitud de l'aportació de la polvorització en estructures d'argila utilitzant drons per aportar material, nous experiments hauran d'estudiar el calibratge adequat de les eines i les possibilitats que ofereixen els drons per construir estructures de fang a gran escala. La polvorització robotitzada sobre encofrats lleugers temporals només és el primer pas d'una revolució que s'està gestant en el sector de



Fig. 10. Mànega del polvoritzador de morter connectada al dron per disposar de subministrament de material constant.

#### AGRAÏMENTS

Els autors han pogut dur a terme els dos casos d'estudi presentats en aquest article gràcies a Pierre Latteur i Sebastien Goessens del Departament d'Enginyeria de la UCL de Lovaina i a la col·laboració amb l'empresa de drons RC Take Off. Aquest projecte ha rebut una beca "Marie Skłodowska-Curie Actions" d'InnoChain: 642877 Horizon2020.

#### REFERÈNCIES

- Augugliaro, F., S. Luashin, M. Hamer, C. Male, M. Hehn, M.W. Mueller, J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler, i 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, i 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., i S. Chaltiel. "Paste Matter 3D Printing In Monolithic Shells Fabrication Methods". Dins *Kine[SIS]tem From Nature to Architectural Matter: Conference Proceedings*, editat per Maria Joao de Oliveira i Filipa Crespo Osório, 10-18. Lisboa: DINÂMIA'CET-IUL, ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa.
- Burry, J., i 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=ctKbGHpAzzo>
- 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". Dins *ACADIA 2017: Disciplines & Disruption: Proceedings Catalog of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, editat per Takehiko Nagakura, Skylar Tibbitts, Mariana Ibañez, i Caitlin Mueller, 248-259. Dover: Acadia Publishing Company.
- Guillaud, H., i H. Houben. 2015. *CRATerre: traité de construction en terre* 4a ed. Marseille: Editions Parenthèses.
- Ramage, M., J. Ochsendorf, P. Rich, J. Bellamy, i 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.