



# Politecnico di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

L'uso diretto/ indiretto dell'additive manufacturing per la costruzione e la progettazione architettonica

This is a PhD Thesis

*Original Citation:*

L'uso diretto/ indiretto dell'additive manufacturing per la costruzione e la progettazione architettonica / Lops, Mariangela.  
- ELETTRONICO. - (2026).

*Availability:*

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/297740> since: 2026-03-04

*Published version*

DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

*Terms of use:*

(Article begins on next page)

L'uso *diretto/indiretto*  
dell'Additive Manufacturing  
per la costruzione e la  
progettazione architettonica





Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



Mariangela Lops

**L'uso *diretto/indiretto* dell'Additive Manufacturing  
per la progettazione e la costruzione architettonica**

Dottorato di ricerca in

“Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il  
Patrimonio”

Dipartimento ArCoD

Politecnico di Bari

**XXXVIII ciclo**

Tutor: prof. Nicola Parisi





Politecnico  
di Bari

Department of Architecture, Construction and Design

**DESIGN FOR HERITAGE:**

**Knowledge and Innovation**

Ph.D. Program XXXVIII

SSD: CEA-09/A – Architectural and Urban Design

**Final Dissertation**

---

*The direct/indirect use of Additive  
Manufacturing for architectural design and  
construction*

---

by

Lops Mariangela

---

Referees:

Prof. Costantino Menna

Arch. Mauro Sàito

Supervisors:

Prof. Nicola Parisi

*Coordinator of Ph.D Program:*

*Prof. Giuseppe Fallacara*

---

*Course n°38, 01/01/2023-31/12/2025*



Politecnico di Bari, Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)  
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio  
XXXVIII ciclo ((2023-2026)



Politecnico  
di Bari

—  
**Ar**  
**Co**  
**D**

dipartimento  
Architettura  
Costruzione  
Design

Dottorato di Ricerca in

“Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio”

Curriculum: Design computazionale e fabbricazione digitale

XXXVIII Ciclo (2023-2026)

Politecnico di Bari

Via Orabona 4

70126 Bari, Italia

Dottoranda: Mariangela Lops

Matricola: 590516

Tutor: Prof. Nicola Parisi

Coordinatore del Dottorato: Prof. Giuseppe Fallacara

*“Nell’età dell’adattamento,  
l’architettura deve attingere  
a tutte le forme di intelligenza:  
naturale, artificiale, collettiva.*

*Nell’età dell’adattamento,  
l’architettura deve rivolgersi  
a più generazioni e a più discipline,  
dalle scienze esatte alle arti.*

*Nell’età dell’adattamento,  
l’architettura deve ripensare  
il concetto di autorialità  
e diventare più inclusiva,  
imparando dalle scienze.*

*L’architettura deve diventare  
flessibile e dinamica,  
proprio come il mondo  
per cui sta progettando.”*

La dichiarazione di Carlo Ratti per la 19<sup>a</sup> Biennale di Architettura di Venezia – "*Intelligens. Naturale. Artificiale. Collettiva.*" – non costituisce soltanto una riflessione teorica sulla condizione contemporanea del progetto, ma identifica un campo operativo concreto in cui l'imperativo dell'adattamento climatico si traduce in prassi sperimentale. Dove la disciplina ha storicamente coltivato l'autorialità individuale e la forma conclusa, Ratti impone apertura, flessibilità, contaminazione. Dove il progetto si è nutrito di certezze, ora deve integrare intelligenze plurali: quella della natura, quella delle macchine, quella dei saperi collettivi.

È precisamente in questo contesto epistemologico che si colloca la presente ricerca interdisciplinare, la quale, integrando progettazione architettonica, scienza dei materiali e ingegneria robotica sta progressivamente delineando un nuovo paradigma per la produzione di elementi costruttivi additivi, capace di coniugare innovazione tecnologica, responsabilità ambientale e ridefinizione dei processi progettuali.

La triade concettuale proposta da Ratti – intelligenza naturale dei materiali naturali e dei processi evolutivi, intelligenza artificiale degli algoritmi computazionali e dei sistemi di machine learning, intelligenza collettiva dei network di ricerca interdisciplinare e della "saggezza della folla" – trova nella fabbricazione additiva un campo di convergenza esemplare, dove queste tre dimensioni dell'intelligenza si intrecciano generando protocolli progettuali inediti.

La necessità di ripensare il processo progettuale come ecosistema di intelligenze diventa qui paradigma operativo:

L'intelligenza naturale si manifesta nei materiali stessi e nei loro comportamenti intrinseci, gli elementi risultanti incorporano intelligenza materiale: geometrie performative che rispondono a sollecitazioni meccaniche, termiche e ambientali attraverso la loro stessa morfologia, annullando la distinzione tra forma, struttura e prestazione. L'intelligenza artificiale, lungi dal sostituirsi al progettista, si configura come strumento di orchestrazione capace di processare simultaneamente variabili materiche, ambientali e performative, generando configurazioni altrimenti inaccessibili al pensiero lineare. L'intelligenza collettiva emerge dalla natura radicalmente interdisciplinare della ricerca: scienza dei materiali, robotica, teoria del progetto, ingegneria ambientale e chimica dei polimeri non si sommano come competenze giustapposte, ma convergono producendo possibilità operative inedite, precluse alla prospettiva monodisciplinare. Il contributo multidisciplinare della ricerca si manifesta nella capacità di attivare cicli virtuosi tra sapere tacito artigianale, conoscenza scientifica parametrica e intuizione progettuale. Ratti rivendica esplicitamente "un modello di autorialità più inclusivo, ispirato alla ricerca scientifica", mettendo in discussione "la tradizione dell'architetto come unico creatore". La fabbricazione additiva robotica incarna questo ribaltamento: il progetto non è più espressione di un'unica volontà autoriale, ma risultante di negoziazioni continue tra agenti umani, computazionali e materiali.

Questo paradigma multidisciplinare prefigura un'architettura post-antropocentrica e climate-responsive: un'intelligenza collettiva che, nell'età dell'adattamento teorizzata da Ratti,

riconosce nella cooperazione tra diversi domini del sapere l'unica via percorribile verso una produzione edilizia sostenibile.

La ricerca sulla fabbricazione additiva robotica con materiali naturali diventa così manifestazione tangibile di quel "diventare flessibile e dinamica" che Ratti rivendica per l'architettura contemporanea: flessibilità nei processi (dalla logica sottrattiva a quella additiva), dinamicità nelle forme (geometrie adattive e responsive), inclusività nelle metodologie (dalla mono-disciplina all'interdisciplinarietà).

Un'architettura che, attingendo simultaneamente alle tre forme di intelligenza, trasforma la crisi climatica da minaccia esistenziale in occasione di radicale reinvenzione epistemologica del fare progettuale.

**Politecnico di Bari, Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)**  
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio  
XXXVIII ciclo ((2023-2026))

## INDICE DELLE TAVOLE DI PROGETTO

<b>00.</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
0.1	Premessa	1
0.2	Struttura della tesi	8
0.3	Obiettivi della tesi	11
0.4	Metodologia e campi di applicazione	15
<b>01.</b>	<b>ADDITIVE MANUFACTURING NEL DESIGN E NELLE COSTRUZIONI .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1</b>	<b>La stampa 3D in architettura</b>	<b>20</b>
1.1.1	Materiali Viscosi nella Stampa 3D Architettonica	22
1.1.2	Approcci di manifattura additiva in architettura	26
<b>1.2</b>	<b>La stampa 3D diretta</b>	<b>30</b>
1.2.1	Tecnologie di stampa 3D diretta	31
1.2.2	Potenzialità e benefici della stampa 3D diretta	36
1.2.3	Criticità tecnologiche e sfide disciplinari	40
<b>1.3</b>	<b>La stampa 3D indiretta</b>	<b>64</b>
1.3.1	Tecnologie di Stampa 3D per Casseforme	65
1.3.2	Classificazione delle Casseforme	73
1.3.3	Opportunità e criticità nella stampa 3D di casseforme	84

## **02. APPLICAZIONI SPERIMENTALI DI NUOVE FORME ..... 90**

### **2.1 Stampa Diretta 95**

2.1.1	Manifattura additiva per forme continue	96
2.1.2	Il contesto della ricerca	110
2.1.3	Il dimostratore architettonico	111
2.1.4	Applicazione pratica: realizzazione del prototipo Vasemode Bench	118

### **2.2 Stampa Indiretta 157**

2.2.1	Manifattura additiva per forme discrete	160
2.2.2	Il contesto della ricerca	184
2.2.3	Il dimostratore architettonico	190
2.2.4	Applicazione pratica: realizzazione del prototipo Beehive Bench	202

## **03. CONCLUSIONI .....260**

### **3.1 Conclusioni e prospettive future 266**

**BIBLIOGRAFIA.....271**

**APPENDICE .....285**

**Disseminazione e Trasferimento del Know-how 285**

- Summer School Self Made Architecture 7 – *Sharing past experiences* 286
- Workshop Ambiente e territorio, moda e agricoltura – Fablab Tutorship e qualificazione imprese 287
- GenerAzioni 290
- STEM Your Brain 290
- *PCTO Galileo* 290

## INDICE DELLE TAVOLE DI PROGETTO

- Tav. 01-** Analisi comparativa tra sistemi di stampa 3D ) p.35
- Tav. 02-** Confronto tecniche di stampa, p.67
- Tav. 03-** Progetti tipologie casseforme, p.77-83
- Tav. 04-** Vista del dimostratore Vasemode Bench, p.113
- Tav. 05-** Processo costruttivo Vasemode Bench, p.115-116
- Tav. 06-** Planimetria livello 0, p. 125
- Tav. 07-** Assonometria livello 0, p.126
- Tav. 08-** Planimetria con punti di *bridge- Livello 1, p.129*
- Tav. 09-** Vista assonometrica- *Livello 1, p.130*
- Tav. 10-** Planimetria livello 2 (+100cm), p.131
- Tav. 11-** Vista assonometrica- *Livello 2, p.132*
- Tav. 12-** Planimetria livello 3 (+150cm), p.133
- Tav. 13-** Vista assonometrica- *Livello 3, p.134*
- Tav. 14-** Vista assonometrica con tappi di copertura, p.143
- Tav. 15-** Planimetria sezioni, p.144
- Tav. 16-** Sezione AA', p.145
- Tav. 17-** Sezione BB', p.146
- Tav. 18** Render di progetto, p.149
- Tav. 19** Render di progetto, p.151
- Tav. 20** Render di progetto, p.152-153
- Tav.21-** Combinazioni dell'ottaedro troncato p.193
- Tav.22 -** Geometria del concio, p.194
- Tav.23-** Prove di configurazioni spaziali, p.197
- Tav.24-** Prove di configurazioni spaziali, p.198
- Tav.25-** Vista del dimostratore Earth Beehive Bench, p.201
- Tav.26-** Creazione dello stampo, p.206

**Tav.27-** Triangolo della tessitura dei suoli riferito al sistema USDA-GeoGebra, p.218

**Tav.28-** Fasi del processo costruttivo di Earth Beehive Bench, p.230

**Tav.29-** Pianta livello 00, p.237

**Tav.30-** Vista assonometrica- livello 00, p.238

**Tav.31 -** Pianta livello 01, p.239

**Tav.32-** Vista assonometrica- livello 01, p.240

**Tav.33-** Pianta livello 02, p.241

**Tav.34-** Vista assonometrica- livello 02, p.242

**Tav.35-** Pianta livello 03, p.243

**Tav.36-** Vista assonometrica- livello 03, p.244

**Tav.37 -** Pianta livello 04, p.245

**Tav.38 -** Vista assonometrica- livello 04, p.246

**Tav.39-** Pianta livello 05, p.247

**Tav.40-** Vista assonometrica- livello 05, p.248

**Tav.41-** Pianta conci di supporto, p.249

**Tav.42-** Vista assonometrica con conci di supporto, p.250

**Tav.43 -** Pianta completa, p.251

**Tav.44 -** Vista assonometrica rete di rinforzo interna, p.252

**Tav.45-** Vista assonometrica completa, p.253

**Tav.46-** Pianta sezioni, p.254

**Tav.47-** Sezione AA', p.255

**Tav. 48-**Sezione BB', p.256

**Tav.49-** Pianta e vista renderizzata, p.259

**Tav.50-**Render di progetto, p.261

**Politecnico di Bari, Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)**  
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio  
XXXVIII ciclo ((2023-2026))

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

## Abstract

L'obiettivo della presente ricerca è indagare le potenzialità dell'integrazione della manifattura additiva nel campo dell'architettura, con particolare attenzione alla generazione di forme e soluzioni costruttive innovative attraverso l'impiego delle tecnologie di stampa 3D. Il lavoro si sviluppa lungo due direttrici principali, corrispondenti a differenti approcci della fabbricazione digitale: da un lato, la fabbricazione diretta, basata sull'estrusione di materiali viscosi; dall'altro, la fabbricazione indiretta, che prevede la realizzazione di casseforme stampate in 3D.

Per entrambi gli approcci è stata adottata una metodologia articolata in due fasi complementari: una fase teorica, dedicata all'analisi critica dello stato dell'arte e alla ricognizione delle tecnologie emergenti, e una fase sperimentale, orientata alla validazione empirica delle ipotesi di ricerca mediante la progettazione e realizzazione di prototipi fisici.

La ricerca si propone di definire un quadro metodologico capace di coniugare la sperimentazione tecnologica con la riflessione teorica, al fine di ampliare le possibilità espressive e costruttive dell'architettura attraverso la manifattura additiva. L'obiettivo ultimo è quello di individuare nuovi paradigmi progettuali che, sfruttando le potenzialità della stampa 3D — sia diretta che indiretta —, consentano di ripensare il rapporto tra forma, materiale e processo, promuovendo un'architettura più flessibile, sostenibile e coerente con le logiche della produzione digitale contemporanea.

*The aim of this research is to investigate the potential of integrating additive manufacturing in the field of architecture, with particular attention to the generation of innovative forms and construction solutions through the use of 3D printing technologies. The work develops along two main lines, corresponding to different approaches to digital manufacturing: on the one hand, direct manufacturing, based on the extrusion of viscous materials; on the other, indirect manufacturing, which involves the creation of 3D-printed formwork.*

*For both approaches, a methodology divided into two complementary phases has been adopted: a theoretical phase, dedicated to the critical analysis of the state of the art and the reconnaissance of emerging technologies, and an experimental phase, oriented towards the empirical validation of research hypotheses through the design and construction of physical prototypes.*

*The research aims to define a methodological framework capable of combining technological experimentation with theoretical reflection, in order to expand the expressive and constructive possibilities of architecture through additive manufacturing. The ultimate goal is to identify new design paradigms that, by exploiting the potential of 3D printing — both direct and indirect —, allow us to rethink the relationship between form, material and process, promoting a more flexible and sustainable architecture that is consistent with the logic of contemporary digital production.*

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

**Politecnico di Bari, Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)**  
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio  
XXXVIII ciclo ((2023-2026))



## 00. INTRODUZIONE

### 0.1 Premessa

La ricerca si inserisce nel XXVIII ciclo del Dottorato di ricerca in “Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio”, Curriculum: *Design Computazionale e Fabbricazione Digitale*, presso il Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD) del Politecnico di Bari.

Questo corso di dottorato affronta le sfide contemporanee del patrimonio architettonico e paesaggistico attraverso un approccio distintivo che integra la conoscenza storico-critica tradizionale con le tecnologie più avanzate. L'obiettivo è creare un ponte tra conservazione e attualizzazione del patrimonio, superando la mera preservazione, per renderlo parte integrante e viva della vita contemporanea, inserendolo attivamente negli usi e nelle pratiche attuali.

Le nuove tecnologie rappresentano il cuore innovativo del corso, assumendo un ruolo strategico e trasversale come paradigma di innovazione per l'attualizzazione e la valorizzazione del patrimonio.

La didattica e la ricerca del corso non si organizzano secondo discipline tradizionali, ma attraverso curricula specifici che trutturano il percorso formativo:

Il curriculum *Patrimonio Storico* si focalizza sulle tematiche legate al restauro, alla conservazione e al riuso di beni architettonici, archeologici, paesaggistici e naturali.

Il curriculum *Città e Territorio* è rivolto agli studi alla scala urbana, affrontando le problematiche del progetto e della pianificazione territoriale.

Il curriculum *Costruzione* approfondisce il rapporto tra progettazione, forma e struttura, esplorando gli aspetti tecnici e costruttivi del patrimonio edilizio.

Il curriculum *Design Computazionale e Fabbricazione Digitale* si concentra sull'utilizzo delle nuove tecnologie di modellazione, visualizzazione immersiva e interattiva, fabbricazione digitale additiva e sottrattiva, con applicazioni sia nella conservazione che nell'innovazione del patrimonio.

Questa struttura permette di affrontare il patrimonio culturale da prospettive complementari, garantendo un approccio interdisciplinare che unisce tradizione e innovazione tecnologica.

La presente tesi si inserisce nel curriculum **Design Computazionale e Fabbricazione Digitale** con l'obiettivo di esplorare le potenzialità della stampa 3D nell'ambito edilizio. L'indagine si concentra su due metodologie distinte: l'approccio di fabbricazione digitale diretta, caratterizzato dall'estrusione controllata di materiali viscosi, e quello indiretto, che sfrutta casseforme stampate in 3D come supporto per la costruzione.

Il progetto di ricerca presentato in questa tesi di dottorato è strettamente connesso al progetto "*The direct/indirect use of additive manufacturing in construction viscous mixtures*" coordinato a livello nazionale dal Prof. Nicola Parisi, che si configura come Progetto 6.10 all'interno dello Spoke 6 del Partenariato Esteso11 "Made in Italy Circolare e Sostenibile" (MICS), rappresentando un caso paradigmatico dell'applicazione della manifattura additiva nel settore delle costruzioni, orientata ai principi di sostenibilità e circolarità.

MICS costituisce uno dei 14 Partenariati Estesi selezionati e finanziati dal MUR (Ministero dell'Università e della Ricerca) attraverso i fondi dell'Unione Europea nell'ambito del programma NextGenerationEU. Il progetto si inserisce nella Missione 4 "Istruzione e Ricerca" - Componente 2 "Dalla ricerca all'impresa" - Investimento 1.3 del PNRR, dedicato ai "Partenariati estesi a Università, centri di ricerca, imprese per il finanziamento di progetti di ricerca di base".

I Partenariati Estesi costituiscono un modello innovativo di governance della ricerca scientifica e tecnologica introdotto dal PNRR. Si caratterizzano per un approccio interdisciplinare, olistico e orientato al *problem solving*, realizzato attraverso reti diffuse di università, Enti Pubblici di Ricerca e altri soggetti pubblici e privati altamente qualificati e internazionalmente riconosciuti. Tale struttura si configura come un ecosistema che integra competenze accademiche, industriali e istituzionali secondo un modello collaborativo finalizzato alla risoluzione di sfide complesse, costituendo un'evoluzione significativa rispetto

ai tradizionali modelli di finanziamento della ricerca, spesso frammentati per singoli progetti o istituti.

Nel caso specifico, la visione di MICS è quella di promuovere una progettazione e produzione del Made in Italy circolare, autosufficiente, affidabile e sostenibile. Il partenariato aggrega i principali centri di ricerca e leader industriali italiani di tre settori strategici del Made in Italy: A1 - Abbigliamento e Moda, A2 - Arredamento (mobili e interni), e A3 - Automazione (meccatronica, meccanica e tecnologia meccanica), configurandosi come hub di eccellenza per l'innovazione sostenibile nel sistema produttivo nazionale.

La struttura organizzativa si articola in otto aree tematiche di ricerca (Spoke), ciascuna dedicata a specifiche linee di investigazione scientifica e tecnologica. L'approccio matriciale adottato consente di affrontare le sfide della sostenibilità secondo una prospettiva sistemica, integrando competenze trasversali ai diversi comparti industriali.

L'inquadramento del progetto 6.10 all'interno dello Spoke 6 "*La manifattura additiva come fattore dirompente della Twin Transition*" assume particolare rilevanza sotto il profilo metodologico e teorico. La definizione della manifattura additiva come elemento "dirompente" della duplice transizione, digitale e ambientale, sottende un'interpretazione non meramente strumentale della tecnologia AM, ma la configura come un paradigma innovativo capace di ridefinire i processi produttivi in chiave sostenibile.

L'ambizione dello Spoke 6 è infatti quella di rivoluzionare l'Additive Manufacturing come tecnologia abilitante della twin transition<sup>1</sup>, riconoscendo nell'AM una soluzione possibile per realizzare una nuova generazione di prodotti verdi e circolari mediante materiali sostenibili e processi a zero scarti, superando i limiti intrinseci delle tecnologie di produzione sottrattiva tradizionali.

Il contributo scientifico e tecnologico del progetto si sviluppa attraverso l'esplorazione delle potenzialità della manifattura additiva nel settore edilizio mediante l'impiego di materiali viscosi, comprendenti miscele cementizie, impasti a base di terra cruda, biopolimeri e materiali compositi naturali. L'approccio metodologico prevede sia l'uso diretto della manifattura additiva, attraverso l'estrusione di impasti viscosi (LDM – Liquid Deposition Modeling) con sistemi di stampa su larga scala, sia l'uso indiretto della tecnologia AM (come il Fused Deposition Modeling – FDM) per la produzione di stampi di colata destinati a tali materiali. Il progetto persegue un duplice obiettivo: da un lato, sviluppare sistemi costruttivi per un'edilizia circolare, basata sul riutilizzo di materiali naturali e di scarto; dall'altro, realizzare forme complesse che non potrebbero essere ottenute con le tradizionali

---

<sup>1</sup>Il termine *twin transition* (transizione gemella) indica l'integrazione sinergica tra la transizione digitale e quella verde, intese come processi complementari per favorire la competitività e la sostenibilità dell'economia europea. Essa promuove l'adozione di tecnologie digitali per accelerare la decarbonizzazione, l'efficienza energetica e l'economia circolare nei diversi settori industriali (European Commission, 2020; European Commission, 2022).

tecnologie, aprendo nuove possibilità espressive e prestazionali per la progettazione architettonica e del design.

Il progetto vede il Politecnico di Bari come partner principale, affiancato da una rete di istituzioni accademiche che contribuiscono con competenze complementari: l'Università La Sapienza di Roma per gli aspetti relativi alla scienza dei materiali e l'ottimizzazione delle miscele, Politecnico di Torino per la componente robotica e lo sviluppo di sistemi di manifattura additiva su misura, e l'Università degli Studi di Napoli Federico II per i calcoli strutturali, la valutazione dell'impatto ambientale mediante Life Cycle Assessment (LCA) e la realizzazione del prototipo di stampa diretta. Questa configurazione multi-istituzionale rispecchia la complessità intrinseca della ricerca sulla manifattura additiva applicata alle costruzioni, che richiede l'integrazione di competenze provenienti dall'ingegneria dei materiali, dall'ingegneria meccanica e robotica, dall'architettura e dall'ingegneria strutturale, secondo un approccio transdisciplinare.

In termini di posizionamento strategico, l'iniziativa si colloca all'intersezione tra ricerca tecnologica applicata e ricerca architettonica sperimentale, contribuendo al corpus di conoscenze relativo all'applicazione della manifattura additiva nelle costruzioni secondo principi di circolarità. La sua integrazione nell'ecosistema MICS garantisce un framework di validazione e trasferimento tecnologico verso il sistema produttivo, configurandosi come esempio paradigmatico di ricerca orientata all'innovazione sostenibile nel contesto delle politiche europee per la transizione ecologica e digitale, in linea

con le priorità del NextGenerationEU: transizione verde, transizione digitale, equità sociale e territoriale.

Come parte della ricerca sperimentale il progetto 6.10, che si concentra sull'ambito A2 – Arredamento – ha sviluppato due dimostratori che rappresentano applicazioni concrete e verificabili dei principi teorici e metodologici del progetto, tradotti alla scala dell'arredo urbano.

L'arredo urbano costituisce infatti un dominio privilegiato per la sperimentazione delle tecnologie di manifattura additiva, configurandosi come scala progettuale intermedia tra l'oggetto industriale e l'edificio architettonico.

Il dimostratore diretto, *Vasemode Bench*, esplora la stampa 3D a deposizione continua di materiali cementizi su larga scala, mentre il dimostratore indiretto, *Earth Beehive Bench*, utilizza stampi additivi in PLA per la costruzione modulare di elementi in terra cruda, secondo principi di reversibilità e circolarità.

Entrambi i dimostratori non solo consentono di testare materiali, processi e geometrie complesse, ma forniscono anche un contributo concreto alla definizione di strategie progettuali e costruttive innovative, consolidando il ruolo dell'arredo urbano come laboratorio sperimentale per l'applicazione della manifattura additiva nel contesto del design e della sostenibilità.

Tutte le elaborazioni grafiche progettuali e le elaborazioni prototipali documentate riportate nel testo sono frutto del lavoro collettivo del gruppo di ricerca del FabLab POLIBA coordinato

scientificamente dal Prof. Parisi, di cui la sottoscritta fa parte, e del team MICS, relativamente alle specifiche competenze.

## **0.2    Struttura della tesi**

La presente ricerca si articola in una struttura organica che alle applicazioni sperimentali, al fine di restituire una visione completa e sistematica dell'Additive Manufacturing applicato al settore dell'architettura. L'impianto generale della tesi è composto da tre capitoli principali, preceduti da un'introduzione metodologica e seguiti da una sezione dedicata alla disseminazione del know-how acquisito.

L'Introduzione (*Capitolo 0*) fornisce il quadro concettuale e metodologico della ricerca. Dopo una premessa che contestualizza il lavoro all'interno del Progetto 6.10 dello Spoke 6 di MICS - "*The direct/indirect use of additive manufacturing in construction viscous mixtures*" - vengono illustrati gli obiettivi della ricerca e la metodologia adottata, definendo i campi di applicazione e le strategie di indagine impiegate per l'esplorazione delle potenzialità della manifattura additiva nel *settore delle costruzioni mediante l'impiego di miscele viscosi*.

Il *Capitolo 1* - "Additive Manufacturing nel Design e nelle Costruzioni" costituisce il nucleo teorico della ricerca, offrendo una panoramica approfondita delle tecnologie di stampa 3D nel design e nelle costruzioni. Dopo un'introduzione generale sulla stampa 3D in architettura (§1.1), con particolare attenzione ai materiali viscosi e agli approcci di manifattura additiva, il capitolo si articola in due sezioni principali che riflettono la struttura duale

del progetto di ricerca. La prima sezione (§1.2) è dedicata alla stampa 3D diretta, analizzandone le tecnologie disponibili, le potenzialità e i benefici applicativi, nonché le criticità tecnologiche e le sfide disciplinari che tale approccio comporta nel contesto architettonico e costruttivo. La seconda sezione (§1.3) esamina invece la stampa 3D indiretta, approfondendo le tecnologie di stampa per casseforme, proponendone una classificazione sistematica e discutendone opportunità e criticità operative. Questa distinzione tra approccio diretto e indiretto rappresenta una chiave interpretativa fondamentale per comprendere le diverse modalità attraverso cui l'Additive Manufacturing può inserirsi nel processo costruttivo, costituendo il framework teorico-operativo dell'intera ricerca.

Il *Capitolo 2* - "Applicazioni Sperimentali di Nuove Forme" rappresenta il cuore operativo della tesi, dove la teoria si traduce in prassi attraverso due filoni sperimentali distinti ma complementari. Il capitolo documenta le sperimentazioni condotte dividendosi simmetricamente in due sezioni corrispondenti ai due approcci investigati. La prima sezione (§2.1) è dedicata alle applicazioni di stampa diretta, esplorando le possibilità offerte dalla manifattura additiva per la realizzazione di forme continue. Attraverso l'analisi del contesto di ricerca (§2.1.2) e la presentazione di un dimostratore architettonico (§2.1.3), vengono investigate sistematicamente le potenzialità in termini di nuove forme (§2.1.4), nuovi materiali (§2.1.5) e nuovi processi (§2.1.6). La seconda sezione (§2.2) si concentra invece sulla stampa indiretta, approfondendo la manifattura additiva per forme discrete. Anche in questo caso, la ricerca procede

dall'inquadramento del contesto (§2.2.2) alla presentazione del dimostratore architettonico (§2.2.3), per poi analizzare criticamente gli sviluppi formali (§2.2.4), materici (§2.2.5) e processuali (§2.2.6) conseguiti. Questa duplice sperimentazione consente di verificare sul campo le potenzialità e i limiti di entrambi gli approcci, offrendo un contributo originale alla conoscenza applicata del settore e permettendo un confronto sistematico tra le due metodologie in termini di fattibilità tecnica, prestazioni materiche e applicabilità architettonica.

Il *Capitolo 3 – “Conclusioni”* conclude la trattazione attraverso una riflessione critica sui risultati della ricerca, integrando la sintesi dei principali esiti con una discussione sulle prospettive di sviluppo dell'Additive Manufacturing in architettura. La sezione non si limita a riassumere quanto emerso, ma inquadra i contributi del lavoro all'interno di un quadro metodologico più ampio, evidenziandone i limiti, le potenzialità e le possibili traiettorie di ricerca futura, e delineando gli orizzonti di evoluzione della disciplina.

Completa la tesi un'*Appendice* dedicata alla disseminazione e al trasferimento del know-how acquisito durante il percorso di ricerca. Attraverso la documentazione di summer school, workshop e iniziative pubbliche di formazione e divulgazione scientifica questa sezione testimonia l'impegno nel condividere competenze e risultati con la comunità scientifica, professionale e territoriale, evidenziando la vocazione applicativa e la dimensione sociale della ricerca svolta, in linea con gli obiettivi di trasferimento tecnologico e impatto sul territorio promossi dal framework MICS.

### **0.3 Obiettivi della tesi**

La presente tesi si propone di indagare le potenzialità dell'Additive Manufacturing in architettura attraverso l'impiego di materiali viscosi, con un focus particolare sulla generazione di forme complesse, sulla progettazione computazionale e sulla composizione architettonica. Tale indagine, sviluppata nell'ambito del Progetto 6.10 dello Spoke 6 di MICS, si inserisce nel più ampio scenario contemporaneo in cui l'architettura è chiamata a confrontarsi con le sfide dell'età dell'adattamento: in questo determinato periodo storico il progetto non può più fondarsi su modelli statici o su certezze formali, ma deve imparare a evolversi in sintonia con i mutamenti ambientali, tecnologici e sociali. In questa prospettiva, la ricerca assume come principio guida l'integrazione di tre forme di intelligenza – naturale, artificiale e collettiva – che, interagendo, possono orientare la trasformazione dei processi progettuali e costruttivi verso un modello più flessibile, collaborativo e sostenibile.

Il primo obiettivo consiste nello sviluppo di processi progettuali capaci di tradurre l'intelligenza artificiale e computazionale in strumento di generazione formale. In questa direzione, la ricerca esplora l'integrazione tra progettazione digitale, algoritmi generativi e manifattura additiva, indagando come tali strumenti possano ampliare il repertorio espressivo dell'architettura. L'approccio computazionale non si configura dunque come mero supporto tecnico, ma come metodologia progettuale in grado di orchestrare variabili materiali, strutturali e ambientali in

configurazioni complesse, restituendo un nuovo rapporto tra forma e prestazione.

In stretta correlazione con la dimensione digitale, la tesi approfondisce il ruolo dell'intelligenza naturale insita nei materiali stessi. L'indagine analizza la fattibilità strutturale e costruttiva delle forme generate, verificando come le proprietà intrinseche dei materiali viscosi – in particolare miscele composte da risorse naturali e di scarto a chilometro zero – possano essere valorizzate attraverso i processi additivi. La ricerca considera tanto gli approcci diretti, mediante estrusione su larga scala, quanto quelli indiretti, basati sull'impiego di stampi prodotti con tecnologie additive, valutando le possibilità di integrazione tra comportamento materico, funzione strutturale e configurazione spaziale.

Parallelamente, la tesi mira a sviluppare un'intelligenza collettiva del progetto, promuovendo un modello di co-creazione tra discipline – architettura, ingegneria, robotica e scienza dei materiali – che rifletta una nuova concezione di autorialità diffusa. L'ottimizzazione della composizione architettonica attraverso processi additivi diventa così occasione per elaborare strategie di organizzazione spaziale che tengano conto della relazione dialettica tra forma, funzione e prestazione tecnica, secondo una logica collaborativa che unisce conoscenza scientifica e intuizione progettuale.

Particolare attenzione viene rivolta all'impiego di materiali locali e sostenibili, in coerenza con le istanze della transizione ecologica promossa da MICS e con la necessità di sviluppare sistemi

costruttivi per un'economia circolare. Tale approccio risponde all'ambizione di ridurre l'impatto ambientale delle attività costruttive – valutato attraverso metodologie di Life Cycle Assessment (LCA) – e di favorire un'integrazione più profonda tra progetto, territorio e risorse locali.

La dimensione sperimentale della ricerca si concretizza nella progettazione e realizzazione di dimostratori architettonici: prototipi e siti pilota che sperimentano la stampa diretta di miscele viscosi con tecnologie robotiche e la fabbricazione indiretta tramite casseforme stampate in 3D. Questi artefatti assumono valore euristico, consentendo di verificare la fattibilità delle forme progettate e di testare la relazione tra composizione delle miscele, strategie additive e comportamento strutturale. I dimostratori costituiscono così la traduzione concreta del paradigma dell'adattamento: una forma di ricerca progettuale che, accogliendo l'incertezza come valore, esplora la flessibilità dei processi, la dinamicità delle forme e la capacità dei materiali di rispondere attivamente alle condizioni ambientali.

Attraverso i prototipi realizzati, la ricerca intende infine esplorare nuovi domini applicativi delle forme generate, individuando possibili impieghi nella costruzione di componenti strutturali, involucri ornamentali, pareti modulari e arredi integrati. L'obiettivo è mostrare come la manifattura additiva possa ridefinire non solo il linguaggio formale dell'architettura, ma anche le sue potenzialità funzionali e prestazionali, configurandosi come tecnologia abilitante della *twin transition* digitale ed ecologica.

Un obiettivo trasversale della ricerca riguarda la minimizzazione dei sistemi di supporto costruttivo, al fine di dimostrare l'efficienza dei processi additivi in termini di risorse, tempi e scarti, e di promuovere un'idea di costruzione "a intelligenza distribuita", capace di apprendere e adattarsi in modo autonomo.

In sintesi, la tesi combina innovazione formale, sperimentazione materiale e strategia digitale, traducendo la triade di Ratti – naturale, artificiale, collettiva – in un sistema operativo per il progetto contemporaneo. L'obiettivo ultimo è contribuire alla definizione di un nuovo paradigma architettonico in cui la fabbricazione additiva diventi non solo strumento tecnico, ma principio epistemologico di un'architettura adattiva, collaborativa e sostenibile, al servizio di un *Made in Italy* circolare e rigenerativo.

#### **0.4 Metodologia e campi di applicazione**

La presente ricerca si è sviluppata attraverso due fasi principali: una prima fase teorica, dedicata all'analisi bibliografica e allo studio dello stato dell'arte, e una seconda fase pratica, basata su esperienze dirette di progettazione e costruzione secondo l'approccio del *learning by doing*, consolidato in diversi contesti accademici internazionali.

La fase pratica ha previsto un percorso di apprendimento fortemente integrato con le attività di laboratorio, finalizzato all'acquisizione di competenze operative sulle tecnologie di fabbricazione additiva applicate all'architettura. Presso il FabLab Poliba, la scrivente ha potuto sperimentare diverse tecnologie di stampa 3D, tra cui Fused Deposition Modeling (FDM) e Liquid Deposition Modeling (LDM) per materiali ceramici e cementizi, realizzando prototipi di differenti scale e complessità. Questa esperienza ha permesso di comprendere direttamente le potenzialità, i vincoli e i parametri critici dei processi additivi su scala architettonica.

La ricerca ha inoltre sviluppato una dimensione collaborativa con laboratori e partner esterni, tra cui l'impiego di un braccio robotico per la stampa 3D presso l'Università di Napoli, che ha permesso di estendere le sperimentazioni a processi di fabbricazione su scala maggiore e con geometrie più complesse. Queste interazioni hanno favorito lo scambio di competenze tra progettisti, ricercatori e operatori tecnici, consolidando un approccio interdisciplinare al processo di prototipazione.

Per ciascun prototipo sperimentale, è stato seguito un iter metodologico strutturato e replicabile, articolato nei seguenti passaggi:

1. Collocazione del prototipo all'interno della macrocategoria di riferimento, definita in base al tipo di tecnologia additiva impiegata (diretta o indiretta) e alle caratteristiche formali dell'elemento.
2. Individuazione e definizione delle condizioni al contorno, comprendenti materiali selezionati, parametri di stampa e strumenti di fabbricazione disponibili.
3. Modellazione e ottimizzazione del prototipo, con particolare attenzione alla geometria, alla funzionalità e alla stampabilità del materiale.
4. Realizzazione fisica del prototipo mediante le tecnologie di fabbricazione additiva disponibili.
5. Analisi critica dell'esito finale, con confronto rispetto ad altre sperimentazioni condotte sia all'interno del progetto sia nella letteratura di riferimento.
6. Sintesi dei risultati, formulazione di conclusioni e individuazione di possibili sviluppi futuri della ricerca.

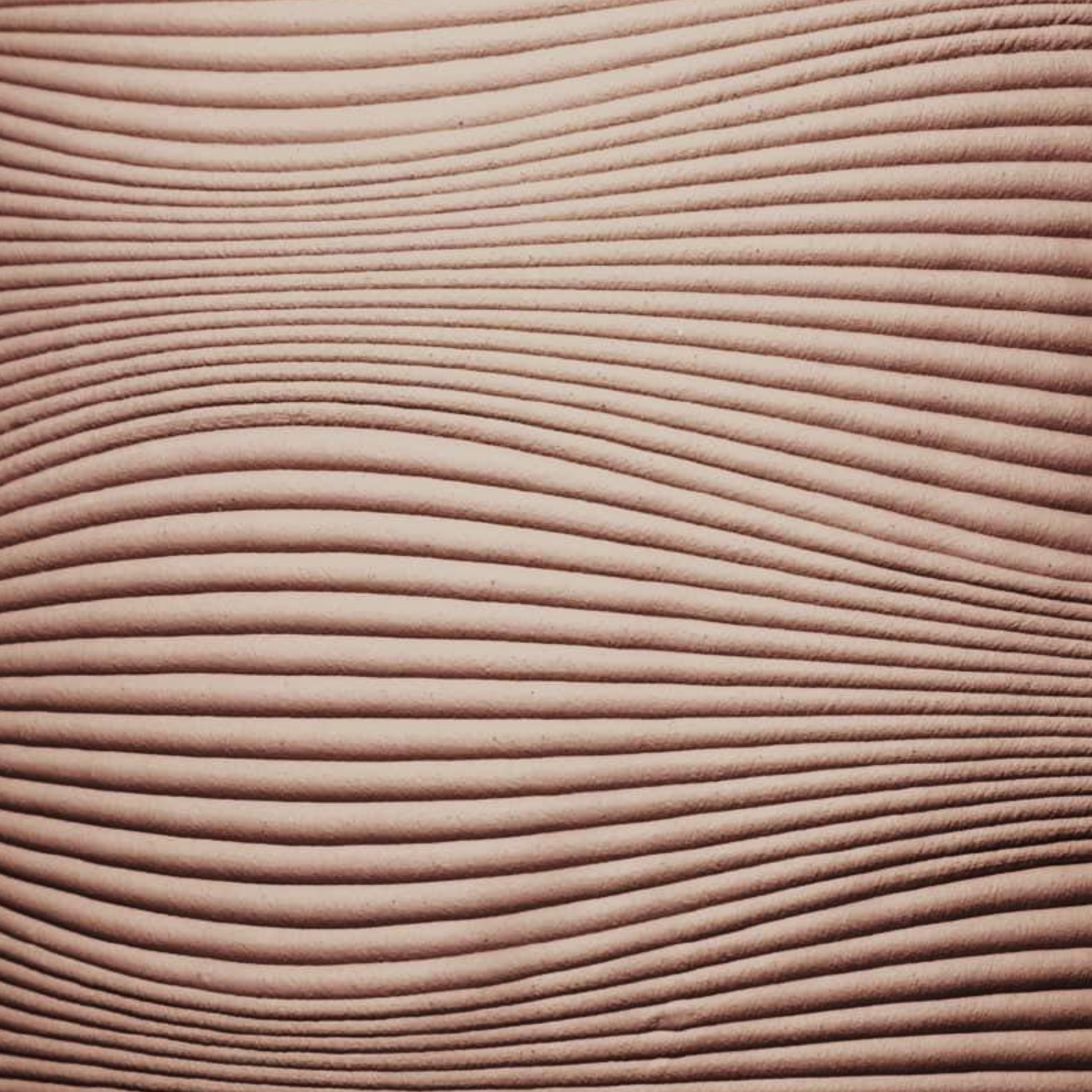
Questo approccio metodologico ha consentito di coniugare riflessione teorica e sperimentazione pratica, evidenziando le potenzialità dell'Additive Manufacturing nella definizione di nuove forme architettoniche, nella gestione dei materiali e nella progettazione di elementi costruttivi complessi. La combinazione di esperienza diretta e collaborazione interdisciplinare ha permesso di sviluppare un metodo replicabile, adatto a supportare progetti su diverse scale e con materiali eterogenei.



**PARTE PRIMA**

**01.**

**ADDITIVE MANUFACTURING  
NEL DESIGN E NELLE COSTRUZIONI**



## 01. ADDITIVE MANUFACTURING NEL DESIGN E NELLE COSTRUZIONI

### 1.1 La stampa 3D in architettura

La fabbricazione digitale costituisce oggi una delle più rilevanti soglie di trasformazione del progetto architettonico e del processo costruttivo. Essa consente di tradurre direttamente il dato informatico in materia, riducendo drasticamente la distanza fra progetto e realizzazione. All'interno di questo scenario, la manifattura additiva – comunemente denominata stampa 3D – si configura come dispositivo paradigmatico, in grado di riformulare in profondità i presupposti stessi del costruire contemporaneo.

Il principio operativo della stampa 3D si fonda sull'aggiunta progressiva di materiale, stratificato secondo logiche algoritmiche e guidato da un modello digitale tridimensionale. In questa modalità costruttiva è insita una cesura rispetto ai metodi tradizionali, sia sottrattivi che formativi, i quali presuppongono la rimozione o il contenimento del materiale in casseforme. La natura additiva del processo libera la forma dai vincoli tipici della carpenteria convenzionale, aprendo a una morfogenesi complessa, capace di accogliere curvature doppie, geometrie non standard e soluzioni strutturali ottimizzate.

La valenza innovativa di questa tecnologia non si esaurisce nell'ambito tecnico, ma si estende a quello culturale e disciplinare. L'eliminazione delle fasi intermedie del processo edilizio consente di instaurare una relazione immediata tra progetto e materia, introducendo nuove possibilità per la personalizzazione architettonica, la riduzione degli sprechi e l'integrazione di criteri di sostenibilità ambientale. Ne deriva una ridefinizione del rapporto tra forma e processo, in cui la



*Alla pagina precedente:  
Figura 1 – Dettaglio di texture realizzata mediante stampa 3D in ceramica. Fonte: WASP – articolo “Stampare in 3D con Grasshopper” disponibile su*

*©<https://www.3dwas.com/stampare-3d-grasshopper/>*

componente digitale non è più mero strumento di rappresentazione, bensì generatore diretto dell'opera costruita. Dal punto di vista storico, le origini della manifattura additiva risalgono agli anni Ottanta, con l'introduzione della stereolitografia sviluppata da Chuck Hull, che per la prima volta tradusse un modello digitale in un artefatto fisico attraverso fotopolimerizzazione. Le successive innovazioni – dalla sinterizzazione selettiva a laser (*SLS*) alla modellazione a deposizione fusa (*FDM*) – ampliarono progressivamente il repertorio materico e scalarono le potenzialità applicative. Il vero passaggio di paradigma si registrò all'inizio del XXI secolo, quando la scadenza dei brevetti favorì la diffusione di macchinari più accessibili, fino a consentire sperimentazioni in ambito architettonico. Tra i pionieri spicca l'esperienza di Enrico Dini con D-Shape, che inaugurò la possibilità di stampare elementi lapidei su larga scala, prefigurando un cambiamento destinato a consolidarsi negli anni successivi.

Queste prime applicazioni, inizialmente percepite come utopiche, hanno assunto nel tempo il carattere di veri e propri manifesti progettuali. Case, padiglioni ed elementi infrastrutturali realizzati con tecniche additive dimostrano oggi la fattibilità del processo su scala edilizia, restituendo alla disciplina una rinnovata tensione sperimentale. La stampa 3D in architettura non si presenta dunque come semplice strumento di prototipazione, ma come matrice di un ripensamento radicale del costruire, capace di coniugare innovazione formale, efficienza produttiva e responsabilità ambientale.

### 1.1.1 Materiali Viscosi nella Stampa 3D Architettonica

Nel campo della manifattura additiva applicata all'architettura, i materiali a comportamento viscoso assumono un ruolo strategico nella produzione di componenti e strutture complesse. Con questa definizione si fa riferimento a miscele che, pur mantenendo un adeguato grado di lavorabilità e la capacità di essere estruse o depositate, possiedono una viscosità sufficiente a conservare la forma e a sostenere il peso degli strati successivi durante il processo di stampa. La questione materica costituisce uno dei nuclei centrali nella sperimentazione della manifattura additiva edilizia, poiché la *stampabilità* degli elementi dipende dalla capacità di modulare la reologia degli impasti, garantendo al contempo adeguate prestazioni meccaniche.

Se nei primi esperimenti la ricerca si è concentrata sulla mera adattabilità dei materiali tradizionali alla logica additiva, oggi si assiste a una vera e propria ridefinizione dei mix design, orientata all'ottimizzazione delle performance e alla riduzione dell'impatto ambientale.

I cementi rappresentano naturalmente i primi materiali oggetto di sperimentazione. L'estrusione richiede tuttavia formulazioni con proprietà apparentemente contrastanti: sufficiente fluidità per consentire la *pompabilità* e rapida presa per garantire la stabilità geometrica. Da qui l'elaborazione di impasti tissotropici, capaci di modificare la viscosità in funzione delle sollecitazioni, oggi ampiamente studiati in ambito accademico e industriale.

Esempi emblematici includono il progetto Project Milestone (*Fig.2b*) nei Paesi Bassi, dove è stata completata la prima casa stampata in cemento in Europa (Eindhoven,), realizzata dall'Eindhoven University of Technology e diverse aziende del settore edilizio. L'intervento dimostra come il calcestruzzo possa essere riformulato per garantire la pompabilità e l'adesione degli strati, riducendo tempi e costi di costruzione e minimizzando gli sprechi

di materiale. A questi si aggiunge House Zero (*Fig.2a*), realizzato da ICON negli Stati Uniti utilizzando il sistema di stampa Vulcan e un calcestruzzo proprietario. Questo progetto rappresenta un esempio di architettura resiliente e sostenibile, in cui la digitalizzazione della costruzione consente di realizzare rapidamente strutture complesse e performanti, riducendo l'impatto ambientale e aprendo nuove possibilità applicative nel settore residenziale.

La riscoperta di argilla e terra cruda testimonia il valore di un approccio che coniuga sostenibilità, disponibilità locale e continuità con tradizioni costruttive millenarie. Progetti come TECLA di WASP (*Fig.2c*), realizzato a Massa Lombarda, dimostrano la possibilità di utilizzare la terra cruda in combinazione con tecnologie additive per generare architetture radicalmente ecocompatibili. A livello internazionale, la giapponese Lib Work Co. (*Fig.2d*) ha sviluppato un prototipo di casa stampata in terra che combina materiali naturali e tecnologie digitali per ridurre l'impatto ambientale e promuovere un nuovo modo di costruire basato sulla rigenerazione locale delle risorse. Particolare attenzione è rivolta alla distribuzione granulometrica e al controllo dell'umidità, parametri indispensabili affinché ogni strato possa sostenere il proprio peso e quello degli strati sovrastanti senza deformazioni. La sfida principale resta legata alla standardizzazione delle prestazioni meccaniche e alla durabilità, aspetti che richiedono approfondimento scientifico per garantire l'inserimento nei processi edilizi normati. Un ulteriore fronte riguarda l'impiego di materiali riciclati, derivati dalla frantumazione di scarti edilizi o da processi industriali. La possibilità di reimmettere nel ciclo produttivo materie seconde risponde a una duplice esigenza: ridurre l'impatto ambientale e sviluppare modelli di economia circolare applicati all'edilizia.

Un aspetto cruciale trasversale a tutte queste categorie materiche riguarda la caratterizzazione reologica della miscela, ovvero la capacità del materiale di fluire correttamente attraverso l'ugello di estrusione e, al contempo, di mantenere stabilità una volta depositato. Da tale equilibrio dipendono non soltanto la qualità del manufatto finale, ma anche la fattibilità complessiva del processo, in termini di velocità di deposizione, risoluzione e portata degli strati. Nel caso delle miscele cementizie, la principale sfida consiste nel coniugare la fluidità necessaria all'estrusione con un rapido processo di indurimento capace di garantire stabilità strutturale.

Le più recenti sperimentazioni si muovono verso l'elaborazione di biocompositi, geopolimeri e miscele a ridotto impatto ambientale, ampliando il ventaglio delle possibilità applicative. I vantaggi legati all'impiego di questi materiali sono molteplici: permettono la realizzazione di forme geometriche libere e personalizzate senza ricorrere a casseforme tradizionali, favoriscono l'utilizzo di risorse locali promuovendo soluzioni costruttive a ridotto impatto ambientale, e consentono l'integrazione di additivi per ottimizzare le prestazioni complessive.

In questa prospettiva, i materiali viscosi si configurano come un ambito di ricerca in continua evoluzione. I materiali per la manifattura additiva non si limitano a replicare in chiave digitale le tradizioni costruttive, ma aprono a un ripensamento radicale delle sostanze stesse con cui l'architettura si concretizza. L'ibridazione tra ricerca sui leganti, valorizzazione delle risorse locali e introduzione di componenti riciclati o bio-based restituisce un quadro in cui il materiale non è semplice supporto della forma, ma parte integrante della sperimentazione progettuale e del discorso disciplinare contemporaneo, orientando l'architettura stampata in 3D verso paradigmi sempre più sostenibili e circolari.



*Alla pagina seguente:  
Fig.2 Esempi di edifici  
realizzate mediante  
stampa 3D.*

*a. House Zero, ICON,  
Texas, 2022.*

*©<https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>*

*b. Project Milestone,  
Eindhoven University  
of Technology, Paesi  
Bassi, 2021.*

*©<https://www.archdaily.com/961135/the-future-is-now-3d-printed-houses-start-to-be-inhabited-in-the-netherlands>*

*c. TECLA, Mario  
Cucinella Architects  
+ WASP, Ravenna,  
2021.*

*©<https://archello.com/it/news/dettaglio-struttura-in-terra-stampata-in-3d-del-prototipo-tecla-ravenna>*

*d. Lib Earth House  
Model B, Lib Work  
Co. + WASP,  
Giappone, 2025.*

*©<https://www.3dwaspc.com/casa-residenziale-in-terra-stampata-in-3d-in-giappone/>*



### 1.1.2 Approcci di manifattura additiva in architettura

Nel contesto della manifattura additiva applicata all'architettura, è possibile distinguere due principali strategie operative che, pur differenziandosi per il modo in cui il materiale e il prodotto finale vengono trattati, condividono l'obiettivo di ampliare le possibilità progettuali e di superare i limiti imposti dai metodi costruttivi tradizionali.

L'**approccio diretto** prevede la realizzazione dell'oggetto architettonico finale attraverso la deposizione strato su strato di materiali viscosi, come terre, cementi o malte speciali, consentendo la costruzione di elementi tridimensionali complessi senza il ricorso a stampi o casseforme. Questo metodo permette di integrare funzioni e prestazioni direttamente nella geometria dell'oggetto, quali canalizzazioni impiantistiche, moduli isolanti o dettagli strutturali, trasformando il componente in un sistema multifunzionale. La possibilità di modulare densità, spessori e texture in tempo reale durante il processo di deposizione offre inoltre un controllo senza precedenti sulla distribuzione del materiale, consentendo ottimizzazioni topologiche che riducono gli sprechi e migliorano le prestazioni meccaniche e termiche. Tuttavia, tale metodo richiede un controllo accurato delle proprietà reologiche del materiale, della coesione tra gli strati e delle variabili ambientali per garantire stabilità, resistenza e precisione dimensionale. La gestione della reologia, in particolare, rappresenta una sfida critica: il materiale deve essere sufficientemente fluido da essere estruso, ma abbastanza viscoso da mantenere la forma sotto il proprio peso e quello degli strati successivi.

L'**approccio indiretto**, invece, utilizza la stampa additiva per creare forme negative o matrici che fungono da stampi per il materiale definitivo, permettendo così di impiegare materiali non idonei all'estrusione diretta, come calcestruzzi ad alte prestazioni, resine, o compositi fibrorinforzati. Questo metodo consente inoltre di ottenere superfici e dettagli difficilmente realizzabili con tecniche convenzionali, quali texture articolate, sottosquadri o geometrie a doppia curvatura, ampliando notevolmente il repertorio formale disponibile. L'efficacia del metodo dipende tuttavia dalla possibilità di smontare lo stampo senza danneggiare il pezzo, dalla precisione geometrica della matrice e dalla gestione sostenibile della forma stessa, che può essere concepita come riutilizzabile, biodegradabile o parte integrante del manufatto finale.

Entrambe le strategie, pur con le loro specificità e vincoli operativi, rappresentano approcci innovativi e complementari che estendono significativamente le potenzialità della progettazione digitale e dei materiali contemporanei, trasformando la manifattura additiva da semplice strumento tecnologico a elemento fondamentale per ripensare il processo costruttivo architettonico in termini di sostenibilità, personalizzazione, efficienza produttiva e libertà formale.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



## 1.2 La stampa 3D diretta

L'approccio diretto si caratterizza per la produzione immediata dell'elemento architettonico desiderato mediante deposizione controllata di materiale viscoso, guidata da un modello digitale. La stampa avviene strato dopo strato, con ogni livello che si sovrappone al precedente fino a ricostruire integralmente l'oggetto. Questo metodo consente di ottenere volumi e superfici complesse senza la necessità di supporti aggiuntivi, favorendo una significativa personalizzazione degli elementi e una riduzione degli scarti. La libertà geometrica offerta dalla stampa diretta permette di integrare funzioni e prestazioni direttamente nella geometria dell'oggetto, come canalizzazioni impiantistiche, moduli isolanti o dettagli strutturali, trasformando la progettazione digitale in uno strumento centrale dell'intero processo costruttivo.

Tuttavia, la realizzazione diretta di componenti architettonici comporta alcune criticità. La stabilità dell'oggetto durante la stampa e l'indurimento dei materiali richiedono un controllo accurato delle proprietà reologiche, affinché il materiale fluisca correttamente dall'ugello e mantenga la forma prevista. La coesione tra gli strati depositati influisce direttamente sulla resistenza e durabilità del prodotto finale, mentre la precisione dimensionale può essere compromessa da variabili ambientali come temperatura e umidità. Nonostante queste sfide, l'approccio diretto rappresenta uno dei metodi più innovativi e promettenti per l'architettura contemporanea, in quanto



*Alla pagina seguente:*

*Fig.3*

*Concrete*

*Choreography,*

*progetto di ricerca*

*sviluppato presso*

*ETH Zurich –*

*Department of*

*Architecture, 2019*

©<https://dbt.arch.eth>

[z.ch/project/concrete](https://dbt.arch.eth)

[-choreography/](https://dbt.arch.eth)

consente di coniugare sostenibilità, personalizzazione e efficienza produttiva.

### 1.2.1 Tecnologie di stampa 3D diretta

Le tecnologie di stampa diretta si distinguono principalmente in base alla configurazione meccanica del sistema di deposizione.

I sistemi a meccanica cartesiana rappresentano il paradigma tecnologico più immediato nella transizione dalle applicazioni manifatturiere alla scala architettonica. Questa configurazione, che eredita direttamente i principi delle stampanti a deposizione fusa, si fonda su un'architettura meccanica estremamente razionale: il movimento controllato lungo tre assi ortogonali consente di mappare lo spazio costruttivo in modo sistematico e prevedibile. Tale approccio risulta particolarmente efficace quando applicato a geometrie regolari e modulari, dove la ripetitività dei movimenti può essere ottimizzata algebricamente, riducendo i tempi di lavorazione e garantendo uniformità dimensionale.

Tuttavia, questa apparente semplicità concettuale nasconde complessità strutturali significative. Il vincolo principale risiede nella necessaria proporzionalità tra le dimensioni del telaio meccanico e l'area di stampa: per ogni incremento del volume costruibile, l'intera struttura portante del sistema deve essere ridimensionata proporzionalmente. Questo non costituisce meramente un problema di scala geometrica, ma introduce implicazioni logistiche e economiche rilevanti. Il trasporto di telai di grandi dimensioni richiede mezzi specializzati, le operazioni di montaggio e smontaggio diventano progressivamente più

laboriose, e la rigidità del sistema limita l'adattabilità. Inoltre, la necessità di predisporre basamenti stabili e livellati per supportare strutture di considerevoli dimensioni introduce ulteriori vincoli nella preparazione del sito, riducendo la flessibilità operativa che rappresenta invece un valore fondamentale nella moderna pratica costruttiva.

In risposta a queste limitazioni, i sistemi robotici articolati hanno guadagnato crescente attenzione nella ricerca accademica e nelle prime applicazioni sperimentali. L'impiego di bracci multi-assiali, derivati dall'industria manifatturiera avanzata, offre maggiore libertà operativa consentendo la deposizione secondo traiettorie non lineari e geometrie curvilinee. A differenza della logica strettamente cartesiana, questi dispositivi operano attraverso la coordinazione di multiple rotazioni angolari, permettendo di raggiungere punti nello spazio tridimensionale secondo traiettorie curvilinee e non lineari. Questa capacità cinematica apre possibilità progettuali precedentemente inaccessibili: la realizzazione di superfici a doppia curvatura, l'ottimizzazione topologica delle sezioni strutturali, l'integrazione di variazioni graduali nelle proprietà materiche attraverso la modulazione dei parametri di deposizione. La precisione posizionale offerta da questi sistemi supera significativamente quella raggiungibile con configurazioni cartesiane di grande scala, dove le deformazioni elastiche del telaio e gli errori di assemblaggio si accumulano proporzionalmente alle dimensioni.

Nonostante questi vantaggi prestazionali, i sistemi robotici articolati presentano una limitazione intrinseca che emerge direttamente dalla loro cinematica: la limitata estensione del volume di lavoro. Questo vincolo geometrico impone scelte strategiche nell'organizzazione del processo costruttivo: si può optare per il montaggio del robot su piattaforme mobili, introducendo però complessità nel mantenimento dell'accuratezza posizionale durante gli spostamenti, oppure si può adottare una logica modulare, prefabbricando componenti di dimensioni compatibili con il volume di lavoro per poi assemblarli in situ.

Tuttavia, la precisione di posizionamento e la ripetibilità dei movimenti garantiscono elevati standard qualitativi, particolarmente rilevanti nella realizzazione di componenti con funzioni strutturali o prestazionali complesse.



*Alla pagina seguente:  
Fig.4*

*a.BOD2,  
stampante 3D a  
portale sviluppata  
da COBOD  
International.*

*©[https://cobod.com/  
solution/bod2/](https://cobod.com/solution/bod2/)*

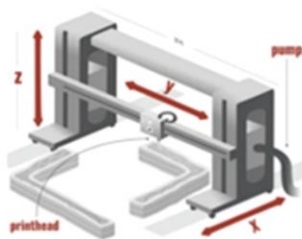

*b. Braccio robotico  
per stampa 3D  
sviluppato da Apis  
Cor*

*©[https://www.apis-  
cor.com/](https://www.apis-cor.com/)*

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



	<b>Sistemi cartesiani</b> <i>Gantry System</i>	<b>Braccio robotico</b> <i>Robotic Arm</i>
		
<b>Struttura</b>	Basata su un telaio cartesiano a tre assi (X, Y, Z) con testina di stampa che si muove lungo guide lineari.	Composta da bracci articolati con più gradi di libertà, simile ai robot industriali.
<b>Gradi di libertà</b>	3 assi lineari (X, Y, Z).	Fino a 6 assi di movimento (rotazioni e traslazioni).
<b>Precisione</b>	Molto precisa nei movimenti lineari e nelle geometrie ortogonali.	Elevata precisione, ma dipendente dalla calibrazione e dalla cinematica
<b>Scalabilità</b>	Può essere ampliato aumentando le dimensioni della struttura, ma a costo elevato.	Facilmente trasportabile e scalabile con bracci di diverse lunghezze.
<b>Tipologia di geometrie</b>	Adatto per forme lineari, muri, volumi semplici e planari.	Ottimale per geometrie complesse, curve e superfici non planari.

**TAV. 01-** Analisi comparativa tra sistemi di stampa 3D a cinematica cartesiana (Gantry System) e a cinematica articolata (Robotic Arm)

### 1.2.2 Potenzialità e benefici della stampa 3D diretta

La stampa 3D in architettura presenta vantaggi significativi che ne giustificano l'interesse crescente nel campo della ricerca e della sperimentazione progettuale.

Uno dei primi aspetti che emergono riguarda la razionalizzazione del processo costruttivo. A differenza dei metodi convenzionali, la fabbricazione additiva consente la realizzazione diretta dell'oggetto architettonico a partire dal modello digitale, eliminando fasi intermedie come la realizzazione di casseforme, stampi o impalcature. Questo comporta una notevole semplificazione del ciclo produttivo, con una conseguente riduzione dei tempi e dei costi di esecuzione. L'assenza di strutture ausiliarie e la deposizione controllata del materiale esclusivamente nelle aree necessarie rendono il processo intrinsecamente sostenibile, non solo sotto il profilo economico, ma anche sotto quello ambientale, in quanto consente di ridurre drasticamente gli sprechi e l'utilizzo di risorse non necessarie.

Un ulteriore vantaggio della stampa 3D in edilizia è legato alla flessibilità geometrica e all'ottimizzazione della forma. I sistemi robotici e le macchine a cinematica cartesiana consentono infatti la realizzazione di configurazioni complesse, superfici curve e strutture non standardizzate con la stessa facilità con cui si producono elementi di geometria semplice. Questa libertà formale restituisce alla progettazione architettonica un potenziale espressivo inedito, permettendo di superare i vincoli imposti dalle tecniche costruttive tradizionali e di generare geometrie ottimizzate non solo dal punto di vista estetico, ma

anche strutturale e funzionale. Grazie all'integrazione tra progettazione computazionale e processo additivo, ogni elemento può essere adattato alle specifiche condizioni di carico, di uso o di contesto, dando origine a una costruzione personalizzata e calibrata sulle esigenze del singolo progetto. In questa prospettiva, la stampa 3D diventa strumento di ottimizzazione materiale e formale, in grado di coniugare leggerezza, efficienza e prestazione.

Dal punto di vista logistico, la possibilità di produrre direttamente in situ rappresenta un ulteriore punto di forza. Pur con le attuali limitazioni legate alla scala operativa, la prospettiva è quella di ridurre in modo significativo il trasporto dei materiali e la necessità di manodopera specializzata, favorendo modelli produttivi più autonomi e decentralizzati. Ciò risulta particolarmente vantaggioso in contesti emergenziali o in aree di difficile accesso, dove la stampa 3D potrebbe consentire la realizzazione rapida di strutture abitative o infrastrutturali con risorse limitate e tempi contenuti.

Un altro aspetto di rilievo riguarda la possibilità di integrare funzioni differenti all'interno del manufatto. Il processo additivo consente di concepire elementi che non si limitano a rispondere a esigenze strutturali, ma che possono incorporare canali impiantistici, sistemi di ventilazione passiva, cavità per l'isolamento o condotti per la dissipazione termica. Tale integrazione tra struttura e impianti favorisce un approccio olistico alla costruzione, in cui forma, funzione e prestazione coincidono in un unico organismo costruttivo.

In parallelo, la possibilità di modulare parametri materici come densità, porosità e granulometria consente di adattare le proprietà meccaniche e termiche del materiale alle diverse esigenze progettuali, introducendo un livello di controllo e precisione inedito rispetto ai metodi tradizionali. A completamento di questo quadro, la precisione del processo produttivo rappresenta un ulteriore vantaggio: la deposizione controllata tramite software garantisce un'elevata accuratezza dimensionale, riducendo gli errori di esecuzione e migliorando la qualità complessiva del prodotto finito. L'integrazione di sistemi di monitoraggio e controllo in tempo reale dei parametri di stampa accresce infine l'affidabilità e la replicabilità del processo, prerequisiti indispensabili per una futura industrializzazione della tecnologia.

Oltre ai vantaggi tecnici, la stampa 3D introduce implicazioni di natura concettuale e culturale che incidono profondamente sul modo di concepire la progettazione. Essa costituisce infatti un nuovo paradigma costruttivo, in cui il confine tra progetto e realizzazione tende a dissolversi, configurando un continuum operativo che integra ideazione e produzione. In tale prospettiva, la figura dell'architetto recupera una dimensione esecutiva, potendo dialogare direttamente con la materia attraverso la mediazione digitale. Ciò implica una ridefinizione del ruolo progettuale, in cui la forma non è più semplicemente disegnata e poi costruita, ma viene generata e prodotta in un unico flusso informativo e operativo.

In conclusione, i vantaggi della stampa 3D in architettura non si esauriscono nell'efficienza operativa o nella precisione tecnica, ma risiedono nella trasformazione radicale del processo progettuale e costruttivo che essa innesca. La fabbricazione additiva consente di costruire in modo più libero, sostenibile e integrato, restituendo alla progettazione una dimensione sperimentale in cui artigianalità e automazione coesistono. Se le criticità precedentemente esaminate costituiscono ancora ostacoli concreti, i vantaggi delineati indicano con chiarezza una direzione di cambiamento strutturale nel modo di concepire, progettare e realizzare l'architettura, suggerendo l'avvento di una nuova era della costruzione digitale.

### 1.2.3 Criticità tecnologiche e sfide disciplinari

Nonostante il potenziale innovativo, la stampa 3D diretta applicata all'architettura si confronta con criticità sostanziali che ne condizionano la diffusione su larga scala. Le problematiche emergenti attengono principalmente a tre ambiti: le limitazioni meccaniche e dimensionali dei sistemi di stampa, il comportamento anisotropo dei materiali depositati per strati e i vincoli geometrici intrinseci al processo additivo.

Benché siano stati compiuti progressi significativi, la produzione in situ su larga scala costituisce ancora una sfida aperta. Le stampanti di grandi dimensioni presentano infatti criticità logistiche rilevanti: risultano difficilmente trasportabili, comportano costi di gestione elevati e richiedono spazi e condizioni operative particolari. Tale problematica limita considerevolmente l'applicabilità della tecnologia in contesti cantieristici ordinari. Per affrontare tali limiti, la ricerca scientifica si sta orientando secondo due direzioni principali. La prima concerne l'ottimizzazione delle meccaniche di deposizione, come nel caso del *Smart Dynamic Casting (SDC)*, un processo di formatura robotizzata continua che consente la realizzazione di elementi strutturali prefabbricati. In questo sistema, una cassaforma dinamica si muove costantemente a velocità controllata, modellando il calcestruzzo in modo fluido e senza interruzioni, permettendo così di migliorare la qualità del materiale e di ridurre i tempi di produzione, mantenendo un elevato controllo morfologico.



Alla pagina seguente:  
Fig.5

*Smart Dynamic Casting (SDC)*, sistema di getto continuo controllato digitalmente sviluppato presso ETH Zurich, 2018.

©<https://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html>



La seconda direzione riguarda invece la prefabbricazione modulare: anziché stampare intere strutture in un'unica soluzione, si procede alla produzione di elementi o moduli di dimensioni ridotte, facilmente gestibili e assemblabili in cantiere. Questa strategia consente di aggirare il problema delle dimensioni della macchina e di estendere il principio della stampa 3D a contesti più diffusi, anche con risorse limitate. La possibilità di produrre componenti in ambiente controllato, con un elevato grado di precisione e ripetibilità, consente di ottimizzare tempi e costi di costruzione, riducendo al minimo gli errori di assemblaggio e gli sprechi di materiale.

Rispetto ai sistemi di prefabbricazione tradizionali, la manifattura additiva introduce un livello di flessibilità geometrica e funzionale senza precedenti: ogni pezzo può essere differente dall'altro, pur mantenendo la stessa efficienza produttiva. Le tecnologie di manifattura additiva permettono infatti ai progettisti di superare i metodi consolidati di progettazione con elementi ceramici, tipicamente confinati a componenti prodotti ripetitivamente in contesti automatizzati mediante macchine, stampi o attrezzature fisse. Ciò consente di realizzare moduli personalizzati, adattabili alle condizioni specifiche del sito o alle esigenze di comfort e prestazione dell'edificio. La stampa 3D permette inoltre di integrare più funzioni all'interno di un unico elemento prefabbricato — per esempio strutturale, isolante e impiantistica — riducendo il numero di componenti da assemblare in cantiere e semplificando notevolmente il processo costruttivo.

Il padiglione *Ceramic Morphologies*, realizzato dal Material Processes + Systems Group della Harvard GSD per CEVISAMA 2017 a Valencia rappresenta un esempio emblematico di questa applicazione della manifattura additiva alla prefabbricazione modulare su scala architettonica. Il progetto ha adottato una strategia di modularizzazione in cui la forma complessiva del padiglione, alto 3 metri con un'impronta di 3,2 x 3,6 metri, è stata scomposta in 552 elementi unici di dimensioni ridotte, variabili tra 260-545 mm di lunghezza e 70-150 mm di altezza, progettati per essere prodotti in ambiente controllato e successivamente assemblati in cantiere. Questa frammentazione è stata determinata da vincoli produttivi precisi: le dimensioni del piano di stampa della stampante 3D PotterBot (508 x 432 x 559 mm) e la capacità massima della cartuccia di argilla, che limitava il percorso utensile a 125.000 mm.

La ricerca ha evidenziato la necessità di sviluppare flussi di lavoro computazionali integrati che combinino modularizzazione e programmazione robotica. Il workflow parametrico sviluppato ha consentito di discretizzare sistematicamente le forme progettuali su larga scala in elementi costruttivi stampabili, valutando automaticamente se una data modularizzazione rispettasse i requisiti della piattaforma di stampa. Il modello parametrico ha controllato non solo la geometria degli elementi ceramici e del telaio metallico di supporto, ma ha anche fornito il controllo diretto della geometria del percorso utensile e della generazione del codice macchina, supportando modifiche progettuali fino a fasi avanzate del processo e integrando tutti i parametri specifici

del materiale e della fabbricazione, inclusi i tassi di ritiro dell'argilla dopo essiccazione e cottura.

Questo approccio ha dimostrato come sia possibile standardizzare il processo produttivo senza standardizzare la forma: tutti i 552 elementi erano geometricamente unici, personalizzati per ottimizzare lo scambio termico attraverso una morfologia irregolare con protuberanze (bumpy), ma compatibili tra loro per l'assemblaggio su un telaio metallico comune con tolleranze di 5 mm. Gli elementi, prodotti off-site, sono stati poi impilati a secco e fissati meccanicamente in cantiere, dimostrando come la prefabbricazione additiva combini l'efficienza della produzione industriale con la libertà progettuale tipica dell'artigianato digitale. Tale approccio favorisce inoltre una logistica più sostenibile e decentralizzata, in cui i moduli possono essere realizzati in officine locali e successivamente assemblati in opera, minimizzando i trasporti e l'impatto ambientale complessivo. In un'unica logica di produzione digitale, è dunque possibile ottenere componenti unici ma compatibili tra loro, rappresentando uno dei maggiori punti di forza di questa tecnologia applicata al contesto costruttivo contemporaneo.

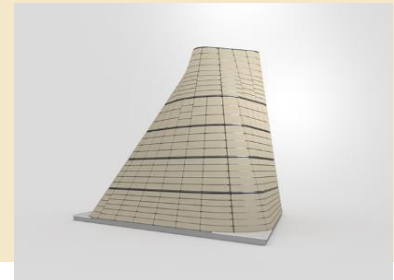
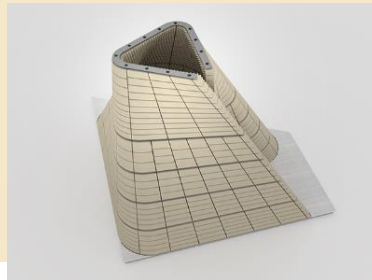
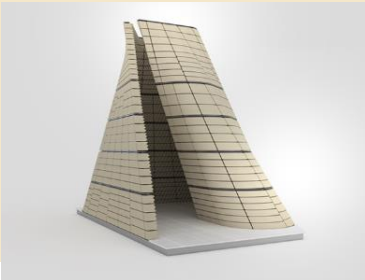
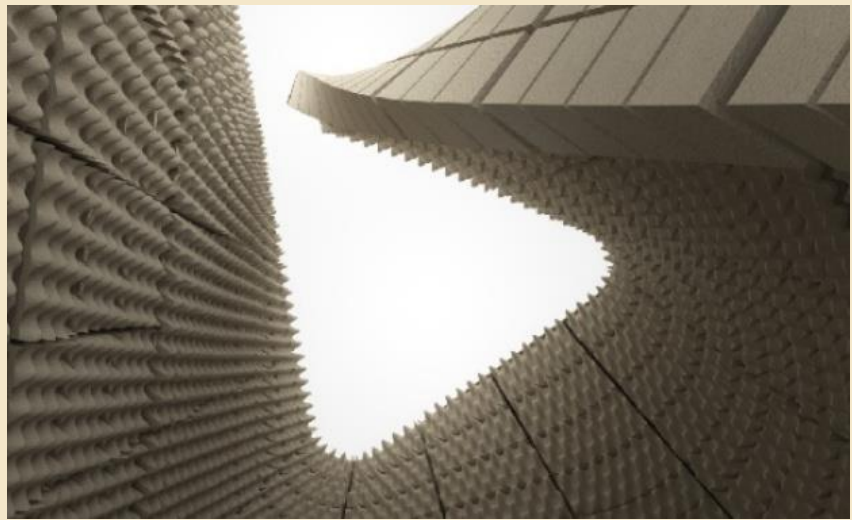
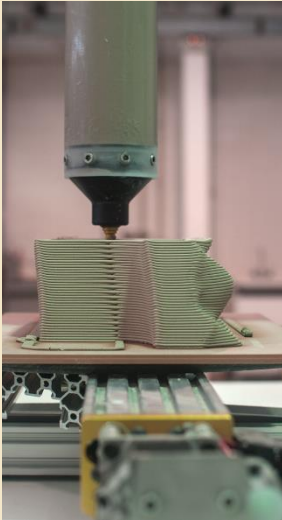
Parallelamente alle questioni relative alla logistica delle meccaniche, lo studio delle miscele per la stampa costituisce uno dei pilastri fondamentali della ricerca nel settore. Le sperimentazioni hanno per oggetto impasti che presentino proprietà adeguate in termini di fluidità, estrudibilità e costruibilità, e che possano indurirsi con tempistiche compatibili con i requisiti del processo di stampa.



*Alla pagina seguente:  
Fig.6*

*Ceramic  
Morphologies,*  
progetto di ricerca del  
MaP+S Group  
(Material Processes  
and Systems Group),  
Harvard University  
Graduate School of  
Design, 2018.

©<https://research.gsd.harvard.edu/maps/2017/01/19/ceramic-morphologies/>



I principali studi e ricerche sui materiali viscosi nella stampa 3D si concentrano su cementi, terre, geopolimeri e additivi naturali sostenibili, affrontando diverse questioni fondamentali che riguardano tanto le proprietà reologiche quanto le prestazioni meccaniche e la sostenibilità ambientale.

Nel campo dei materiali a base cementizia, la ricerca si è orientata verso lo sviluppo di nuovi mix design specificamente formulati per la stampa 3D, con particolare attenzione alle proprietà di estrusione necessarie per applicazioni sia strutturali che non strutturali. Gli studi disponibili in letteratura esaminano le diverse concentrazioni e tipologie di inerti e aggregati, l'effetto di diversi regolatori del tempo di presa (acceleranti e ritardanti) e di additivi modificatori di viscosità, approfondendo la correlazione tra lavorabilità del materiale fresco e prestazioni meccaniche una volta indurito. L'obiettivo è ottimizzare miscele che mantengano un'adeguata fluidità durante l'estrusione pur garantendo un rapido sviluppo di resistenza dopo la deposizione.

Contestualmente, emerge una crescente attenzione verso la sostenibilità: l'integrazione di materiali di scarto industriale come fumo di silice e non solo contribuisce a ridurre l'impatto ambientale delle miscele cementizie, ma può anche migliorarne alcune proprietà fisico-meccaniche, creando un circolo virtuoso tra economia circolare e innovazione tecnologica.

I geopolimeri rappresentano oggi uno dei materiali più promettenti per l'edilizia sostenibile e per la stampa 3D, perché offrono un'alternativa più ecologica ai cementi tradizionali. A differenza del cemento Portland, che richiede temperature molto elevate per

la produzione e comporta elevate emissioni di anidride carbonica, i geopolimeri si ottengono attraverso una reazione chimica che avviene a temperatura ambiente, con un consumo energetico decisamente inferiore. Gli studi si concentrano sulle proprietà specifiche dei geopolimeri per la stampa 3D, indagando come la loro struttura chimica influenzi la stampabilità e le caratteristiche meccaniche finali. La ricerca esplora inoltre formulazioni innovative che incorporano materiali riciclati o naturali, cercando di sviluppare mix geopolimerici che siano al contempo stampabili, performanti e sostenibili dal punto di vista ambientale.

L'utilizzo di additivi naturali e modificatori di viscosità rappresenta un filone di ricerca trasversale che interessa tutti i materiali viscosi impiegati nella stampa 3D costruttiva. Gli additivi naturali, derivati da fonti rinnovabili, permettono di modificare le proprietà reologiche delle miscele senza compromettere la loro compatibilità ambientale. Questo approccio ha portato allo sviluppo di inchiostri e miscele sostenibili che combinano prestazioni tecniche elevate con un ridotto impatto ecologico. L'implementazione di tali additivi nelle miscele cementizie e nelle formulazioni a base di terre consente di adeguare la consistenza del materiale alle specifiche esigenze del processo di stampa, migliorando contestualmente la sostenibilità complessiva del sistema costruttivo.

Le terre e i materiali argillosi costituiscono un campo di ricerca di particolare interesse, soprattutto in prospettiva di un'architettura a basso impatto ambientale e radicata nelle tradizioni costruttive locali. Gli studi si focalizzano sull'identificazione e la

sperimentazione di modificatori di viscosità che permettano di formulare terre stampabili con adeguata lavorabilità e stabilità dimensionale, superando i limiti intrinseci di questi materiali naturali. Le ricerche applicative esplorano come le terre naturali possano essere migliorate attraverso l'aggiunta di additivi specifici, ottenendo miscele idonee alla costruzione mediante stampa 3D senza rinunciare alle caratteristiche di sostenibilità, traspirabilità e comfort igrometrico tipiche dell'edilizia in terra cruda.

Ed è proprio sul piano materico che emerge con chiarezza uno dei vantaggi più significativi della tecnologia additiva: la stampa 3D consente infatti di sperimentare nuove miscele e compositi ad alte prestazioni, includendo l'impiego di materiali locali o derivanti da processi di riciclo. L'utilizzo di calcestruzzi modificati, impasti naturali o biocompositi apre la strada a un'architettura sostenibile e circolare, capace di coniugare innovazione tecnologica e responsabilità ambientale. Inoltre, la possibilità di modulare parametri quali densità, porosità e granulometria del materiale consente di adattare le proprietà meccaniche e termiche alle diverse esigenze progettuali, trasformando così una necessità tecnica in un'opportunità di sperimentazione materica avanzata.



*Alla pagina seguente:  
Fig.7*

Applicazione della stampa 3D a base di geopolimeri per componenti edilizi

©<https://www.3dwas.com/en/geopolymer-3d-printing/>



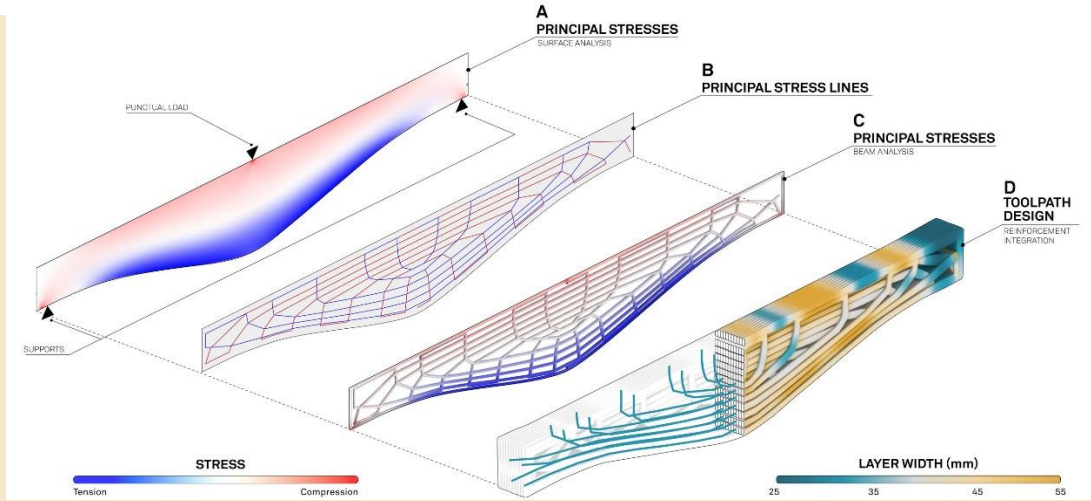
Tuttavia, un aspetto cruciale che accompagna la riflessione sui materiali di stampa attiene al comportamento meccanico dei materiali stampati. Il processo di deposizione per strati conferisce infatti ai materiali una marcata anisotropia, ossia una resistenza differenziata in funzione della direzione di carico. In particolare, le strutture risultano resistenti lungo la direzione dell'asse di stampa, ma significativamente più deboli perpendicolarmente ad essa. Ciò comporta che la struttura possa sopportare adeguatamente i carichi verticali, ma risulti vulnerabile in presenza di sollecitazioni flessionali o torsionali. Per contrastare tale problematica, la letteratura scientifica propone diverse strategie di rinforzo: alcune prevedono l'inserimento di armature prima dell'estrusione, altre la loro integrazione simultanea al processo di stampa, ad esempio mediante barre diritte o piegate che seguono il percorso di deposizione, mentre un'ulteriore possibilità consiste nell'aggiunta di fibre all'interno dell'impasto, che migliorano l'adesione *layer-to-layer*. Infine, in alcuni casi, si interviene post-stampa, applicando tiranti o rinforzi esterni. Un esempio significativo di come la ricerca stia affrontando queste problematiche proviene dall'Università di Stoccarda, dove è stato sviluppato un approccio basato sull'ottimizzazione del design dello strato. Attraverso la manipolazione del percorso utensile e il controllo della velocità di estrusione, i ricercatori hanno sperimentato una struttura interna a griglia porosa, con travi di rinforzo inserite durante la stampa. Il prototipo così ottenuto ha dimostrato prestazioni meccaniche superiori rispetto a modelli stampati con semplici layer orizzontali, evidenziando come la soluzione possa risiedere non esclusivamente nei materiali, ma anche nella geometria del percorso di deposizione.



Alla pagina seguente:  
Fig.8

– 3D *LightBeam+*,  
sviluppato presso la  
University of Southern  
Denmark (SDU), 2023

©<https://www.create-sdu.com/projects/3dlig-htbeam2>



Tale approccio manifesta uno dei vantaggi più rilevanti della tecnologia additiva: la flessibilità geometrica.

I sistemi robotici e le macchine a cinematica cartesiana consentono infatti la realizzazione di forme complesse, superfici curve e strutture non standardizzate con analoga facilità rispetto alla produzione di elementi semplici. In tal senso, la stampa 3D emancipa la progettazione architettonica dai vincoli imposti dai sistemi costruttivi tradizionali, favorendo una rinnovata libertà espressiva e la possibilità di generare geometrie ottimizzate dal punto di vista strutturale e funzionale. L'integrazione della progettazione computazionale con il processo di stampa consente inoltre l'adattamento di ciascun elemento alle specifiche condizioni di carico o d'uso, configurando prospettive inedite verso una costruzione personalizzata e calibrata sulle esigenze del singolo progetto.

Però, come naturale conseguenza della flessibilità geometrica e accanto alle problematiche strutturali appena discusse, sussistono limiti geometrici connessi alla natura stessa del processo additivo. La stratificazione continua impone vincoli alla realizzazione di sporgenze, sbalzi e aperture, poiché ogni nuovo strato deve poggiare su quello precedente. Nei materiali viscosi, quali i calcestruzzi stampabili, tale limite risulta ancora più evidente, dato che non è possibile utilizzare supporti rimovibili come avviene nella stampa di polimeri o metalli. Tuttavia, anche in questo caso, la ricerca architettonica ha saputo trasformare il vincolo in opportunità progettuale. Un esempio emblematico di come il limite geometrico intrinseco al processo additivo possa

trasformarsi in opportunità progettuale è rappresentato dalla reinterpretazione della volta nubiana in chiave additiva.

La volta nubiana è un'antica tecnica costruttiva originaria della Nubia, nell'attuale Alto Egitto, che consente la realizzazione di coperture voltate utilizzando mattoni di argilla cruda disposti con malta, senza l'ausilio di centine o strutture di supporto temporanee. Il principio costruttivo si basa sulla disposizione dei mattoni secondo strati inclinati, che si appoggiano progressivamente a una parete di fondo, formando una volta semicircolare che nella parte finale assume la forma di una catenaria. Il sistema costruttivo si fonda sul concetto che, una volta stabilizzati gli archi inclinati e mantenute costanti le dimensioni degli strati, è possibile posizionare ulteriori strati di mattoni inclinati senza comprometterne la stabilità complessiva.

La trasposizione di questo principio millenario nel contesto della manifattura additiva ha costituito l'oggetto di una ricerca sperimentale originariamente sviluppata nel Laboratorio di laurea in Architettura e Costruzione del Politecnico di Bari nel 2020, nell'ambito della tesi *“Self Made Architecture – Additive Manufacturing in Architecture”*. L'intuizione fondamentale risiede nel riconoscimento delle analogie strutturali tra i sistemi costruttivi in muratura e i processi di stampa 3D su larga scala: entrambi si basano sulla sovrapposizione di strati di componenti identici in maniera ripetitiva, con ogni strato intrinsecamente dipendente dal precedente per la stabilità strutturale; entrambi lavorano efficacemente in compressione ma scarsamente in trazione; in entrambi i casi, gli elementi discreti o gli strati estrusi

acquisiscono la loro forma stabile finale attraverso un processo di essiccazione o indurimento del materiale legante.

La sfida principale nella realizzazione di coperture mediante manifattura additiva risiede nel fatto che la stratificazione orizzontale convenzionale – in cui gli strati sono paralleli al piano di terra – presenta limiti statici evidenti quando si tenta di costruire elementi aggettanti o di chiusura superiore. Il materiale viscoso estruso, sottoposto a gravità e ancora in fase plastica, non è in grado di sostenere il proprio peso quando disposto secondo geometrie fortemente inclinate o orizzontali, con conseguenti deformazioni o collassi strutturali. La soluzione proposta dalla ricerca del Politecnico di Bari consiste nell'adozione di una strategia di stampa *non-planar*, in cui il percorso utensile viene programmato per seguire superfici inclinate anziché piani orizzontali, replicando digitalmente la logica costruttiva della volta nubiana tradizionale.

Il processo sperimentale ha previsto diverse fasi metodologiche. Inizialmente, è stata condotta la modellazione tridimensionale parametrica della volta nubiana mediante il software Rhinoceros®, sulla quale sono state generate sezioni multiple inclinate a 45° rispetto alla verticale. Successivamente, attraverso l'ambiente di programmazione visuale Grasshopper®, è stato elaborato un G-code personalizzato capace di istruire la stampante 3D WASP Delta 40100 a estrarre strati di argilla industriale secondo traiettorie inclinate. Questa riprogrammazione del toolpath rappresenta una deviazione sostanziale rispetto alle logiche convenzionali di slicing, in cui il

modello tridimensionale viene sezionato in piani orizzontali equidistanti.

I test di stampa condotti presso il Fablab Poliba di Bitonto hanno fornito evidenze empiriche determinanti: mentre i prototipi realizzati mediante estrusione orizzontale convenzionale manifestavano evidenti difficoltà statiche nella fase di chiusura della copertura – con gli strati di argilla incapaci di sostenere il proprio carico durante la finalizzazione della volta – i modelli realizzati con strati inclinati secondo la logica nubiana non presentavano le medesime criticità strutturali. L'inclinazione degli strati garantisce infatti che il materiale viscoso, ancora in fase di asciugatura, lavori prevalentemente in compressione, distribuendo i carichi secondo la linea delle spinte e consentendo a ogni nuovo strato di appoggiarsi stabilmente su quello precedente.

Successivamente, i principi teorici e le soluzioni formali emersi dalla ricerca sono stati ulteriormente approfonditi e sistematizzati in una serie di contributi scientifici, tra i quali si segnala, a titolo esemplificativo, il paper di Parisi (2023), *New Directions of 3D Printed Earth Architecture*, presentato all'*Italian Workshop on Shell and Spatial Structures* e pubblicato negli atti del convegno.

A conferma della rilevanza del tema anche oltre il contesto accademico in cui è nato, la volta nubiana stampata in 3D è stata successivamente realizzata in scala reale dall'architetto Ronald Rael in collaborazione con Barrak Darweesh, che ne ha reinterpretato i principi costruttivi in chiave sperimentale,

dimostrando la concreta applicabilità delle logiche additive alla costruzione di strutture voltate.

Il prototipo in scala reale, realizzato a La Florida, Colorado, rappresenta un'applicazione concreta e un'evoluzione dei principi teorici elaborati dal Politecnico di Bari. La struttura, lunga 5 metri, larga 2,5 metri e alta 3 metri, è stata costruita utilizzando adobe locale come materiale di stampa, confermando che il successo dell'esperimento non dipende dall'utilizzo di materiali a rapido indurimento come il calcestruzzo. La volta è stata stampata mediante una piattaforma robotica mobile dotata di braccio industriale a 7 assi montato su un rimorchio piano lungo 6 metri, seguendo un percorso di estrusione non planare con pattern a onda quadra inclinato di 30° verso un'abside di supporto. A differenza delle volte nubiane tradizionali che richiedono una parete di fondo, la geometria progettata da Rael e Darweesh incorpora un'abside che consente agli strati di partire direttamente dal piano di terra. Il pattern a onda quadra aumenta lo spessore delle pareti stampate per garantire la stabilità strutturale, mentre nelle sezioni superiori della volta l'ampiezza dell'onda viene progressivamente ridotta per alleggerire il peso dell'arco nelle porzioni sommitali.

Un aspetto particolarmente significativo dell'esperimento di Rael e Darweesh riguarda la gestione dei tempi di asciugatura dell'adobe, materiale caratterizzato da un indurimento lento privo di reazioni chimiche accelerate. Per affrontare questa criticità e rendere il processo di stampa più efficiente, la struttura è stata segmentata in sezioni di toolpath multiple, permettendo a ciascuna sezione di asciugare adeguatamente prima di procedere

con la successiva. Le condizioni meteorologiche – con giornate soleggiate e ventose che accelerano il processo di curing – si sono rivelate determinanti nel definire i tempi di costruzione, con il completamento della volta raggiunto in circa un mese. Questo approccio dimostra che la manifattura additiva può gestire efficacemente anche materiali a lenta essiccazione attraverso strategie di programmazione del toolpath e segmentazione temporale del processo costruttivo, aprendo prospettive concrete per l'applicazione di questa tecnologia in contesti caratterizzati da scarsità di materiali da costruzione convenzionali o in situazioni di emergenza abitativa.



*Alla pagina seguente:  
Fig.9*

a. Costruzione tradizionale di volta nubiana in terra cruda.

©<https://www.lavoutenubienne.org/en/>

b. *Self-Made Architecture* V, prototipo sperimentale in terra stampata in 3D.

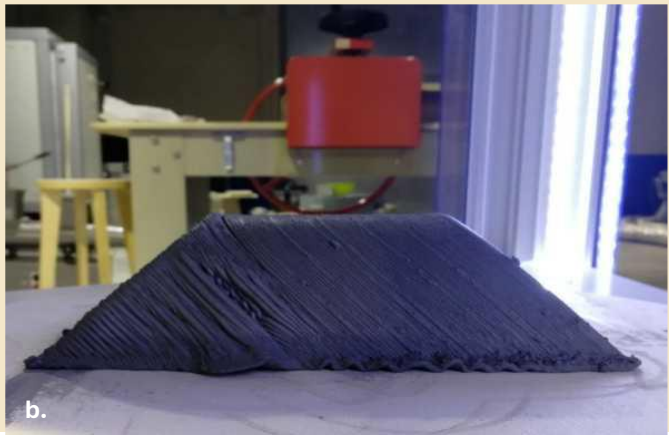
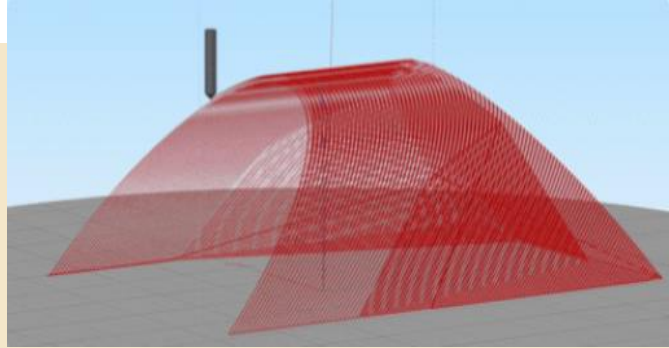
©SelfMade Architecture V

c. Volta nubiana realizzata mediante stampa 3D, progetto di Ronald Rael, 2024

©[https://static1.squarespace.com/static/5a6afcc3b078693423db26ad/t/66e2fa0380e12f64ddf5102d/1726151173612/Slot19\\_077\\_Ronald-Rael\\_2024.pdf/](https://static1.squarespace.com/static/5a6afcc3b078693423db26ad/t/66e2fa0380e12f64ddf5102d/1726151173612/Slot19_077_Ronald-Rael_2024.pdf/)

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*





c.



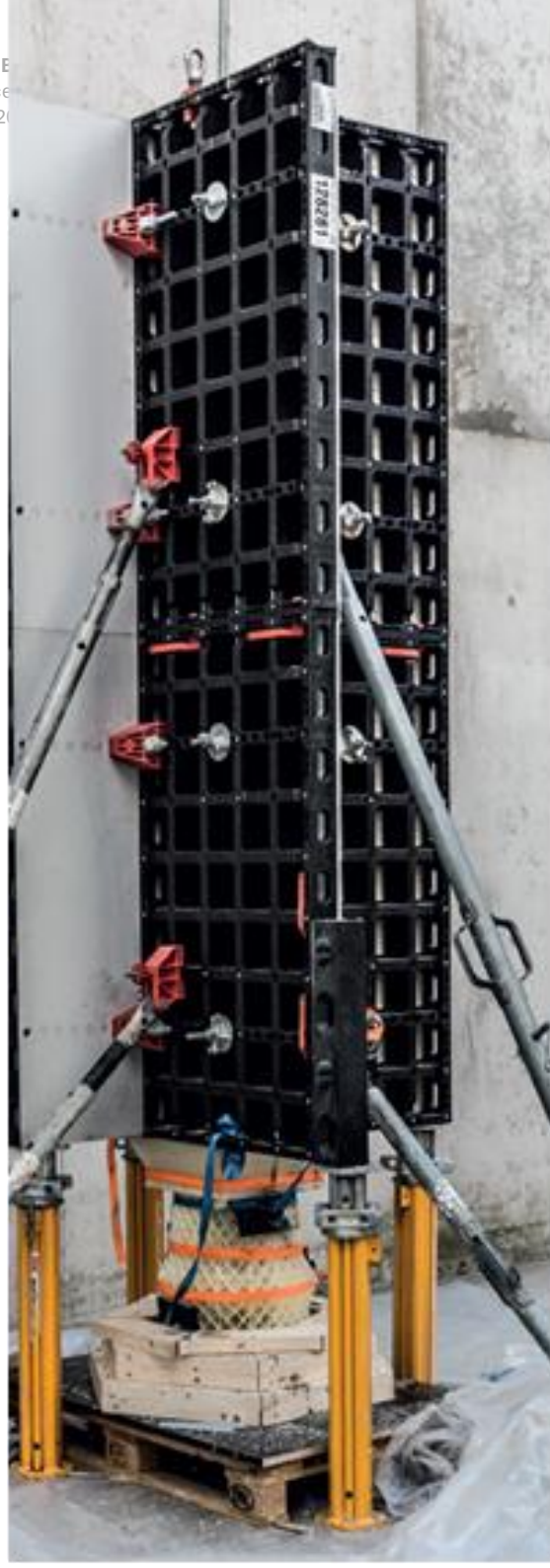
Questi esempi manifestano come la stampa 3D costituisca un nuovo paradigma costruttivo in cui il confine tra progetto e realizzazione tende ad assottigliarsi fino a configurare un continuum operativo. In questo scenario, la figura dell'architetto recupera una dimensione anche esecutiva, potendo dialogare direttamente con la materia attraverso la mediazione digitale. Tale trasformazione implica una ridefinizione del ruolo progettuale, in cui la forma non è più disegnata e successivamente costruita, ma generata e prodotta all'interno di un unico flusso informativo. La reinterpretazione della volta nubiana mediante stampa obliqua costituisce pertanto un esempio significativo di questo nuovo approccio: un principio costruttivo tradizionale viene riletto e implementato attraverso la progettazione computazionale e la robotica, dimostrando come la tecnologia additiva possa fungere da ponte tra sapere costruttivo storico e innovazione digitale.

In definitiva, il campo della stampa 3D per l'architettura si trova attualmente in una fase di transizione: le potenzialità sono considerevoli, ma le sfide tecniche e materiali rimangono aperte. Le soluzioni più promettenti sembrano emergere dall'incontro tra innovazione tecnologica, progettazione computazionale e conoscenza costruttiva tradizionale. I vantaggi della stampa 3D in architettura non risiedono esclusivamente nell'efficienza operativa o nella precisione tecnica, ma nella trasformazione profonda del processo progettuale e costruttivo. Si tratta di una tecnologia che consente di costruire in modo più libero, sostenibile e integrato, restituendo alla progettazione una dimensione sperimentale che coniuga artigianalità e automazione. Se le criticità analizzate costituiscono ancora

ostacoli concreti, i vantaggi delineano con chiarezza una direzione di cambiamento strutturale nel modo di concepire, progettare e realizzare l'architettura. Solo attraverso l'integrazione di questi ambiti sarà possibile sviluppare una produzione additiva effettivamente scalabile, efficiente e capace di ridefinire il rapporto tra forma, materia e costruzione nell'architettura contemporanea.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



### 1.3 La stampa 3D indiretta

L'approccio indiretto, invece, si fonda sulla realizzazione di matrici o casseforme tramite stampa 3D, che fungono da contenitori per il materiale definitivo. In questo modo, l'oggetto architettonico non viene creato direttamente dalla stampa, ma è definito dalla forma dello stampo che lo contiene. Tale strategia consente di utilizzare materiali o miscele non adatti all'estrusione diretta, o di ottenere superfici e dettagli difficilmente riproducibili con metodi convenzionali. La produzione di casseforme sagomate in plastica, —sabbia solidificata o altri compositi permette, ad esempio, la colata di calcestruzzo o terra cruda stabilizzata con geometrie complesse, personalizzate e funzionali.

L'approccio indiretto offre notevole flessibilità progettuale, poiché ogni stampo può essere adattato alle esigenze specifiche del singolo elemento o di piccole serie produttive. Tuttavia, l'efficacia del metodo dipende dalla possibilità di smontare lo stampo senza danneggiare il pezzo, dalla precisione geometrica nella riproduzione della forma e dalla gestione della sostenibilità della matrice stessa, che deve essere progettata considerando riuso, riciclo o smaltimento. Nonostante questi vincoli, la strategia indiretta consente di superare i limiti tecnologici dei materiali e amplia le possibilità creative e costruttive dell'architettura, rendendola complementare all'approccio diretto.



*Alla pagina precedente:  
Fig.10  
Additive Archetypes,  
ETH Zurich-2019*

*©<https://dbt.arch.ethz.ch/project/additive-archetypes/>*

### 1.3.1 Tecnologie di Stampa 3D per Casseforme

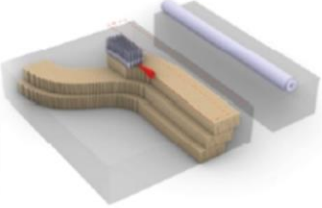
La stampa 3D di casseforme rappresenta oggi un approccio strategico per la digitalizzazione dell'edilizia in calcestruzzo, consentendo di superare i vincoli geometrici imposti dalle tradizionali casseforme a pannello piano e aprendo la strada alla realizzazione di architetture complesse che promuovono l'efficienza materica e l'integrazione funzionale degli elementi costruttivi. Diversamente dalle tecnologie di estrusione diretta del calcestruzzo, che eliminano completamente la necessità di casseforme ma introducono significative criticità strutturali e problematiche legate all'integrazione dell'armatura, la fabbricazione indiretta mediante stampa tridimensionale di casseforme permette di trasferire la libertà geometrica propria dei processi additivi agli elementi in calcestruzzo, mantenendo al contempo l'utilizzo di processi di getto o spruzzatura convenzionali e di materiali ben compresi e certificati secondo le normative vigenti.

All'interno di questo paradigma tecnologico, la ricerca ha identificato due principali tecnologie di manifattura additiva particolarmente adatte alla produzione di casseforme caratterizzate da elevati dettagli geometrici e volumi di costruzione significativi: l'estrusione di polimeri e il getto di legante. Queste tecniche si basano prevalentemente su processi come il **Material Extrusion (a)** o il **Binder Jetting (b)**, originariamente sviluppati in ambito industriale, ma applicati oggi anche in architettura per la realizzazione di casseforme

complesse, spesso impossibili da ottenere con i metodi tradizionali di carpenteria.

La peculiarità della stampa indiretta risiede nella possibilità di impiegare materiali diversi da quelli destinati alla costruzione finale, privilegiando facilità di stampa, leggerezza, rimovibilità o riutilizzabilità. In questo senso, la fabbricazione additiva diventa uno strumento di ottimizzazione del processo edilizio, permettendo di realizzare getti in calcestruzzo con geometrie articolate o elementi prefabbricati ad alto livello di dettaglio, senza compromettere le proprietà strutturali dei materiali impiegati.

Il progetto *DFAB House* ( ), costituisce un esempio emblematico di questa logica: matrici stampate in 3D hanno permesso di ottenere superfici complesse in calcestruzzo mediante getto tradizionale, dimostrando come l'ibridazione tra digitale e materiale possa generare nuove possibilità espressive e strutturali. Tali applicazioni evidenziano come la stampa 3D di casseforme non sia solo uno strumento per la sperimentazione geometrica, ma una tecnologia matura in grado di integrare efficienza, precisione e innovazione nei processi costruttivi contemporanei.

	<b>Estrusione di materiale</b> <i>Material Extrusion</i>	<b>Getto di legante</b> <i>Binder Jetting</i>
		
<b>Principio di funzionamento</b>	Deposizione strato dopo strato di un materiale (polimeri, calcestruzzo, schiume minerali o polimeriche, argilla) tramite ugello	Applicazione selettiva di un legante liquido su strati di polvere (solitamente sabbia)
<b>Dettaglio geometrico</b>	Medio-alto, adatto a condotti interni e forme complesse	Altissimo, fino a 0,15–0,35 mm, ideale per dettagli ornamentali e superfici complesse
<b>Libertà geometrica</b>	Elevata, consente forme autoportanti e grandi volumi	Estrema, sbalzi, vuoti interni e geometrie complesse senza supporti
<b>Materiale</b>	Polimeri termoplastici, calcestruzzo estrudibile, schiume isolanti, argilla	Sabbia legata da legante liquido; superficie porosa richiede
<b>Vantaggi principali</b>	Possibilità di creare gusci funzionali o permanenti, ottimizzazione del consumo di materiale, leggerezza, integrazione di isolamento o servizi	Risoluzione elevata, libertà geometrica, indipendenza dalla complessità, integrazione di dettagli e ornamenti

**TAV. 02-** Tavola comparativa delle tecnologie di fabbricazione additiva: estrusione di materiale e getto di legante

L' estrusione di materiale (*Material Extrusion*) rappresenta una delle tecnologie più versatili e strategiche per la fabbricazione di casseforme, grazie alla sua capacità di realizzare geometrie complesse e componenti funzionali con un elevato grado di precisione. Tale processo, basato sulla deposizione controllata di materiale attraverso un ugello, può impiegare una vasta gamma di sostanze — dai polimeri termoplastici ai materiali cementizi, fino a schiume minerali o polimeriche e argilla estrudibile — offrendo così differenti proprietà meccaniche e comportamentali in funzione dell'applicazione.

L'estrusione di calcestruzzo si configura come una delle varianti più promettenti, in quanto consente di ottenere casseforme a rimanere (*stay-in-place formworks*) direttamente integrate nella struttura finale. In questo caso, i gusci stampati possono fungere da matrice per ulteriori getti o come strato strutturale esterno, aprendo a nuove possibilità di ibridazione tra fabbricazione additiva e processi edilizi tradizionali. Allo stesso modo, l'estrusione di schiume minerali o plastiche polimeriche permette la creazione di casseforme leggere, permanenti e termicamente isolanti, che uniscono precisione formale e prestazioni funzionali, riducendo il peso complessivo degli elementi edilizi. L'uso di argilla estrusa, invece, introduce un approccio sostenibile e reversibile, poiché consente la realizzazione di casseforme a perdere facilmente rimovibili tramite lavaggio o immersione in acqua dopo la maturazione del calcestruzzo.

In tutti i casi, la tecnologia di estrusione garantisce un'elevata libertà geometrica, rendendo possibile la fabbricazione di gusci curvi, condotti integrati o superfici complesse altrimenti

irrealizzabili con sistemi tradizionali. Le principali criticità riguardano la gestione della pressione idrostatica del calcestruzzo fresco, la stabilità dimensionale dei gusci e, nei casi di materiali polimerici o cementizi, la compatibilità reologica e l'adesione tra strati. Queste problematiche sono affrontate attraverso strategie di contro-pressione durante il getto, ottimizzazione dei parametri di deposizione e scelta mirata dei materiali in funzione della destinazione d'uso — temporanea, permanente o funzionale.

La tecnologia di stampa 3D tramite getto di legante (*Binder Jetting*) rappresenta una delle soluzioni più avanzate per la realizzazione di casseforme ad alta risoluzione e geometria complessa. Il processo si basa sulla deposizione selettiva di un legante liquido su strati sottili di materiale in polvere — generalmente sabbia silicea o quarzifera — fino alla costruzione progressiva dell'oggetto. Ciò consente di ottenere superfici estremamente dettagliate, con risoluzioni comprese tra 0,15 e 0,35 mm, e una libertà geometrica quasi illimitata. L'aspetto più rilevante di questa tecnologia risiede nella possibilità di creare forme complesse, sottosquadri e cavità interne senza l'ausilio di supporti temporanei: la polvere non consolidata svolge infatti una funzione di sostegno naturale durante la stampa. Tale caratteristica permette di realizzare casseforme per elementi architettonici con gradi di complessità e precisione difficilmente raggiungibili con altri metodi additivi, come dimostrano i casi del *Smart Slab* (2018), dell'*HiRes Slab* (2021) e del padiglione *Incidental Space* (2016), dove l'impiego del *Binder Jetting* ha consentito la fabbricazione di solette nervate e conchiglie

ornamentali con integrazione di impianti e texture digitali ad altissima definizione. Tuttavia, la fragilità intrinseca del materiale stampato — un'arenaria artificiale porosa — impone spessori minimi compresi tra 6 e 10 mm per garantire stabilità durante la post-lavorazione e la movimentazione. Inoltre, la porosità della superficie rende necessario un trattamento sigillante per evitare l'adesione chimica con il calcestruzzo fresco: due strati di resina poliestere o epossidica si sono dimostrati sufficienti per permettere una sformatura controllata, mentre nel caso di casseforme permanenti o "a perdere" si adotta spesso un solo strato di infiltrazione. Un ulteriore limite è dato dai vincoli reologici del calcestruzzo, che condizionano la minima scala dei dettagli stampabili in funzione della dimensione delle fibre e degli aggregati: in genere, i diametri dei condotti e i raggi di curvatura devono superare almeno il doppio della lunghezza della fibra per garantire un flusso ottimale del materiale. Nonostante tali sfide, il *Binder Jetting* si conferma una tecnologia chiave per la produzione di casseforme ad altissima risoluzione, capace di coniugare libertà formale, dettaglio ornamentale e integrazione funzionale, aprendo la strada a sistemi costruttivi ibridi in cui la precisione del getto di legante si combina con la rapidità e la robustezza dell'estrusione di materiali cementizi o argillosi.



*Alla pagina seguente:  
Fig.11  
a. Krypton, Xtree, Aix-en-Provence, -2017*

*©<https://www.xtreee.com/uses-cases/krypton%2C-a-column-in-aix-en-provence>*

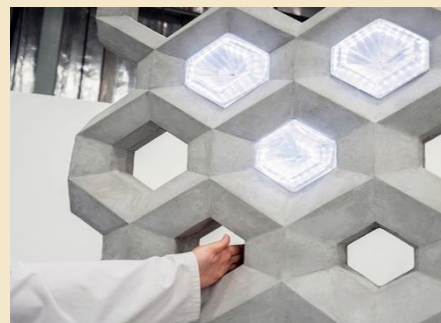
*b. Cocoon, University of Michigan- 2023*

*©<https://www.ruxinx.com/project/04>*

*c. Smart concrete wall, NowLab- BigRep, Berlino, 2018*

*©<https://www.designboom.com/architecture/smart-concrete-wall-nowlab-bigrep-3d-printing-06-27-2018/>*

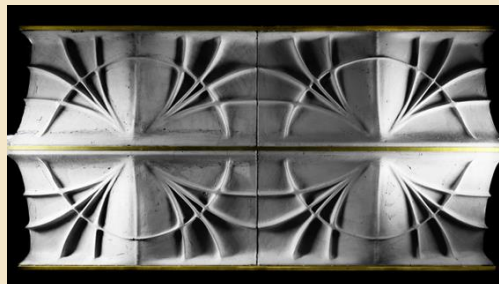
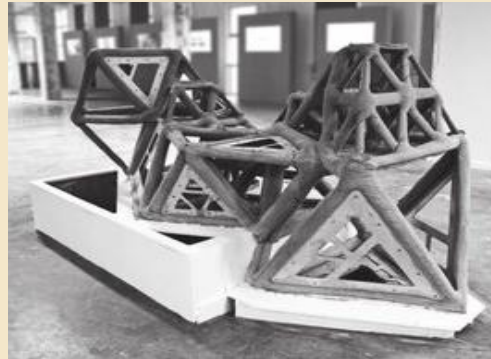
- Estrusione di materiale



Mariangela Lops

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

- **Getto di legante**





Alla pagina  
precedente:  
Fig. 12

d. *Recursive Lattices*,  
Morel and Schwartz -  
2015

©[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24208-8\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24208-8_18)

e. *Incidental Space*,  
Christian Kerez-2016

©<https://www.designboom.com/architecture/venice-architecture-venice-architect-architecture-biennale-2016-swiss-pavilion-christian-keresz-05-26-2016/>

f. *Fast Complexity*,  
ETH Zurich -2020

©<https://www.dezeen.com/2020/07/02/eth-zurich-3d-printing-concrete-casting-fast-complexity/>

### 1.3.2 Classificazione delle Casseforme

Le fonti analizzate evidenziano numerosi esempi di casseforme stampate in 3D, suddivisibili in due principali categorie in funzione del loro comportamento post-getto e della loro permanenza nella struttura indurita: le casseforme removibili e le casseforme a perdere (o permanenti). L'obiettivo comune di tali tecnologie è quello di superare i limiti intrinseci delle casseforme tradizionali a pannelli piani, responsabili di elementi costruttivi spesso inefficienti e sovradimensionati, promuovendo invece la possibilità di realizzare geometrie complesse e strutturalmente ottimizzate.

Le casseforme removibili comprendono due sottocategorie: riutilizzabili e monouso. Le casseforme riutilizzabili vengono progettate per essere smontate e impiegate più volte, rappresentando una soluzione economicamente vantaggiosa per la fabbricazione di elementi edilizi con geometrie complesse che richiedono un grado significativo di ripetibilità. Le casseforme riutilizzabili personalizzate sono progettate e segmentate per consentire una sformatura direzionale. È necessario un rivestimento per impedire che il calcestruzzo umido si leghi alla superficie stampata in 3D. Sono inoltre necessari collegamenti meccanici reversibili e meccanismi di sgancio tra le parti della cassaforma. Le casseforme riutilizzabili devono essere più robuste e utilizzare più materiale per resistere alle ripetute manipolazioni e assemblaggi. Tuttavia, l'elevato numero di

riutilizzi può mitigare i costi di produzione più elevati e comportare un costo per getto inferiore

Le casseforme monouso vengono solitamente rimosse con un processo distruttivo una volta che il calcestruzzo si è indurito e non sono destinate ad essere riutilizzate per gettare un altro pezzo identico. Convenzionalmente, le casseforme monouso sono utilizzate per forme complesse e uniche nel loro genere, per le quali non è richiesta la riutilizzabilità. Lo svantaggio delle casseforme monouso è la natura dispendiosa del processo e, implicitamente, l'elevata energia incorporata. Le ricerche più avanzate, come la *Submillimetre Formwork*, hanno introdotto gusci sottilissimi (tra 0,4 e 1,2 mm) stampati in polimero, in grado di garantire un'elevata definizione formale con un consumo ridotto di materiale. Esempari in tal senso sono la *SkeLETHon*, una canoa in calcestruzzo realizzata con casseforme in PLA traslucido, e la *STEP2 Stair*, una scala elicoidale i cui gradini a sbalzo sono stati ottenuti mediante casseforme rinforzate con fibra di carbonio. A queste si affiancano casi emblematici come la *Smart Slab* e *l'Incidental Space*, dove l'uso di casseforme in *binder-jetting* monouso ha permesso la creazione di geometrie estremamente complesse, pur a scapito della loro distruzione finale. Particolare interesse rivestono anche le casseforme solubili in acqua, realizzate in alcol polivinilico (PVA), e le tecnologie *FreeFab Wax Formwork* e *XtreeE Truss*, che impiegano materiali riciclabili come la cera o l'argilla, aprendo la strada a processi di fabbricazione più circolari.

Le **casseforme a perdere o permanenti** rappresentano una diversa concezione del processo costruttivo, poiché rimangono

incorporate nell'elemento in calcestruzzo e spesso ne potenziano le prestazioni. Le **casseforme funzionali** non si limitano a definire la forma, ma rimangono in posizione dopo l'indurimento e forniscono ulteriori funzionalità al componente in calcestruzzo, quali protezione antincendio, proprietà acustiche, isolamento o finitura superficiale.

Ne sono esempio la *HiRes Slab* e la *Funicular Floor Slab*, che integrano sistemi di ventilazione e condotti idronici direttamente all'interno della struttura. Similmente, il progetto *Yhnova Foam Formwork* sfrutta l'estrusione di schiume polimeriche per realizzare pareti con elevate prestazioni isolanti, mentre *Concrete Choreography* utilizza la stampa 3D di calcestruzzo come cassaforma stessa, fondendo processo e prodotto in un unico sistema costruttivo. In continuità con tale approccio, il *Contour Crafting*, uno dei primi esempi di stampa 3D di calcestruzzo, genera gusci che fungono da cassaforme a perdere e da copertura protettiva per l'armatura, dimostrando un potenziale applicativo su scala edilizia.

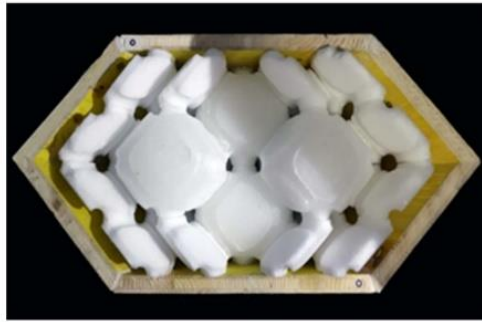
Le **casseforme strutturali** possono essere considerate un sottotipo delle casseforme funzionali permanenti, ma contribuiscono in modo specifico alla capacità strutturale degli elementi, solitamente fornendo un rinforzo a trazione. Pertanto, le casseforme strutturali diventano parte integrante della struttura in cemento armato, agendo insieme come materiale composito.

Le casseforme strutturali si dividono principalmente in due tipologie: quelle realizzate con lamiere nervate, impiegate soprattutto per i solai, e quelle basate su rinforzi tessili, utilizzate

per la creazione di geometrie libere e complesse. In entrambi i casi, la cassaforma resta incorporata dopo la maturazione, contribuendo alla resistenza dell'elemento come rinforzo assiale o a taglio. I materiali impiegati nella stampa 3D, però, non raggiungono generalmente la resistenza a trazione tipica dell'acciaio, risultando quindi inadatti come rinforzo principale. Alcuni polimeri, come il nylon, e in particolare i compositi rinforzati con fibre di carbonio, offrono però buone proprietà meccaniche e possono essere utilizzati come rinforzo secondario, migliorando la resistenza alla trazione e la durabilità superficiale del manufatto.

Un esempio significativo è il progetto *Mesh Mould*, in cui una rete tridimensionale stampata in 3D ha svolto la funzione di rinforzo secondario, contribuendo al controllo delle fessurazioni del calcestruzzo.

Nel complesso, la stampa 3D applicata alle casseforme si configura come un campo di sperimentazione in rapido sviluppo, capace di ridefinire il rapporto tra forma, materia e processo costruttivo. Dalle soluzioni riutilizzabili e modulari alle casseforme ultraleggere e riciclabili, fino ai sistemi integrati e strutturalmente attivi, emerge una prospettiva in cui la fabbricazione additiva non solo amplia la libertà progettuale, ma introduce nuovi paradigmi di sostenibilità, efficienza e precisione nell'architettura contemporanea.



<b>Progetto</b>	<i>Cold Production</i>
<b>Autore</b>	<i>Team Master in Advanced Studies in Architecture and Digital Fabrication 2021-2022 (MAS DFAB)</i>
<b>Luogo</b>	<i>ETH Zurich, Svizzera</i>
<b>Anno</b>	<i>2021-2022</i>
<b>Materiale</b>	<i>Cemento per l'elemento strutturale; stampi di ghiaccio (ice formwork) per ottenere le forme</i>
<b>Tecnologia</b>	<i>Casseforme temporanee stampate in 3D con ghiaccio mediante processo robotico controllato digitalmente (ice formwork).</i>
<b>Breve descrizione</b>	<i>Cold Works sperimenta l'uso del ghiaccio come materiale per casseforme digitali, che si sciolgono dopo il getto di calcestruzzo, eliminando la necessità di stampi fisici permanenti. Il processo unisce robotica e modellazione computazionale per generare geometrie complesse e sostenibili, riducendo gli sprechi e aprendo nuove possibilità per la fabbricazione additiva nel contesto edilizio.</i>



**Progetto**

*Eggshell Pavilion*

**Autore**

*Gramazio Kohler Research*

**Luogo**

*Vitra Design Museum, Weil am Rhein (Germania)*

**Anno**

*2022*

**Materiale**

*PET-G riciclato rinforzato con fibra di vetro, calcestruzzo a presa rapida e autocompattante, armature in acciaio*

**Tecnologia**

*Stampa 3D robotica di casseforme ultrasottili (3–5 mm), progettazione computazionale e colata controllata digitalmente*

**Breve descrizione**

*L'Eggshell Pavilion impiega una tecnica di robotic 3D printing di casseforme in PET-G riciclato, successivamente riempite con calcestruzzo ad alte prestazioni. La precisione della stampa consente spessori minimi e geometrie complesse, ottimizzando l'uso del materiale. Il processo, gestito da algoritmi di design parametrico, integra fabbricazione robotica e colata controllata per ottenere elementi strutturali leggeri e ad alta efficienza.*



**Progetto**

*Additive Thermoplastic Formwork for Freeform*

**Autore**

*Mania Aghaei Meibodi, Christopher Voltl, Ryan Craney*

**Luogo**

*Taubman College, University of Michigan (USA)*

**Anno**

*2020*

**Materiale**

*PLA, PVA, PETG (termoplastici)*

**Tecnologia**

*FDM 3D printing (filament-based e robotic pellet extrusion)*

**Breve descrizione**

*La ricerca esplora l'uso della stampa 3D a deposizione fusa per realizzare casseforme termoplastiche destinate a colonne in calcestruzzo dalle geometrie complesse. Attraverso tre casi studio — in PLA, PVA e PETG — vengono analizzate le potenzialità e i limiti di ciascun materiale in termini di libertà formale, resistenza e rimozione del cassero. Il progetto dimostra come l'impiego combinato di materiali e tecniche additive possa ottimizzare tempi, costi e complessità geometrica, introducendo nuove prospettive per casseforme leggere, riutilizzabili e personalizzabili.*



<b>Progetto</b>	<i>High-Resolution Additive Formwork for Building-Scale Concrete Panels</i>
<b>Autore</b>	<i>Roberto Naboni, Luca Breseghello</i>
<b>Luogo</b>	<i>CREATE Lab, University of Southern Denmark</i>
<b>Anno</b>	2020
<b>Materiale</b>	<i>PLA (termoplastico biodegradabile) e calcestruzzo UHPFRC (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete)</i>
<b>Tecnologia</b>	<i>Stampa 3D FDM (Fused Deposition Modelling) con pellet di PLA riciclato</i>
<b>Breve descrizione</b>	<i>La ricerca esplora l'uso della stampa 3D FDM per produrre casseforme leggere e riutilizzabili destinate a pannelli in calcestruzzo ad alta risoluzione. Attraverso esperimenti su diversi polimeri e otto pannelli di facciata, il progetto dimostra la possibilità di ottenere superfici complesse e dettagliate con deviazioni minime (&lt;2 mm), riducendo tempi e costi di produzione rispetto ai metodi tradizionali.</i>



**Progetto**

*The Funicular Floor*

**Autore**

*Block Research Group & Chair of Digital Building Technologies*

**Luogo**

*ETH Pavillon a Davos, Svizzera (esposizione al World*

**Anno**

*2019*

**Materiale**

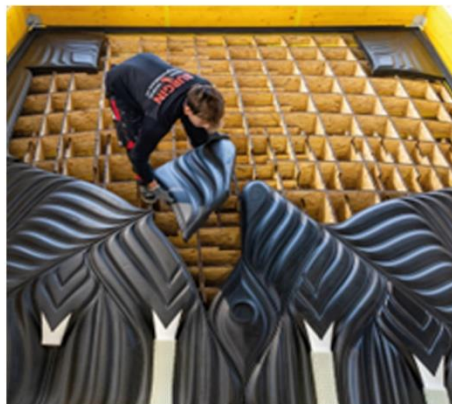
*calcestruzzo (con aggregati anche riciclati), forme stampate in plastica bio-based riciclabile (PLA) per i casseri sottili;*

**Tecnologia**

*stampa 3D (FDM) di formwork su misura ultraleggeri, integrazione di sistemi di condizionamento/ventilazione/raffreddamento all'interno della massa del solaio tramite cavità previste dal disegno digitale*

**Breve descrizione**

*Sistema sperimentale di solaio ottimizzato strutturalmente mediante progettazione algoritmica e fabbricazione additiva di casseforme. Il metodo consente una riduzione fino al 70% del materiale impiegato rispetto a un solaio tradizionale, mantenendo le prestazioni meccaniche e integrando le infrastrutture impiantistiche all'interno della sezione.*



## Progetto

*HiRes: 3D-Printed Formwork for an Integrated Slab*

## Autore

*Andrei Jipa, Gearóid Lydon, Angela Yoo*

## Luogo

*NEST Research Building, Dübendorf, Svizzera*

## Anno

*2022*

## Materiale

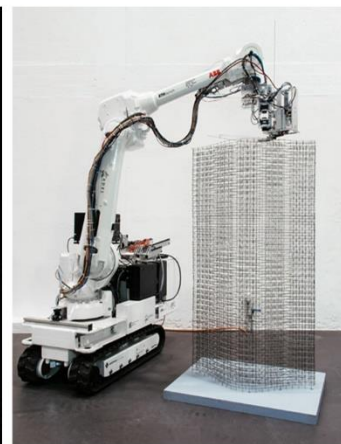
*Calcestruzzo ad alte prestazioni (UHPC) colato in casseforme stampate in 3D in PES (polietersulfone) e sand-binder jetting per le parti ad alta risoluzione*

## Tecnologia

*Stampa 3D ibrida – FDM (Fused Deposition Modelling) per la struttura principale della cassaforma e binder jetting su sabbia per i dettagli complessi; assemblaggio modulare delle forme e colata monolitica di calcestruzzo*

## Breve descrizione

*Prototipo di solaio in calcestruzzo ad alta definizione ottenuto mediante casseforme stampate in 3D con tecniche miste (FDM e binder jetting). Il sistema consente l'integrazione di canali funzionali per ventilazione e impianti, la riduzione del materiale e un'elevata precisione geometrica, dimostrando le potenzialità della fabbricazione digitale ibrida nella costruzione di elementi strutturali complessi.*



<b>Progetto</b>	<b><i>Mesh Mould Prefabrication</i></b>
<b>Autore</b>	<i>Gramazio Kohler Research &amp; Chair of Concrete Structures and Bridge Design</i>
<b>Luogo</b>	<i>Zurigo, Svizzera</i>
<b>Anno</b>	<i>2019-2021</i>
<b>Materiale</b>	<i>Fase iniziale: polimeri termoplastici (ABS) per mesh stampate 3D Fase avanzata: acciaio per mesh robotizzate autoportanti, calcestruzzo a elevata fluidità</i>
<b>Tecnologia</b>	<i>Fase 1 (Mesh Mould Polymer): stampa3D robotica per l'estrusione di mesh polimeriche che fungono da cassaforma e armatura integrata Fase 2 (Mesh Mould Metal): costruzione robotica di maglie metalliche mediante piegatura e saldatura automatizzata</i>
<b>Breve descrizione</b>	<i>Mesh Mould unisce in un unico sistema costruttivo la funzione di armatura e di cassaforma, consentendo la realizzazione di strutture in calcestruzzo complesse senza stampi aggiuntivi. Nato come esperimento di stampa 3D robotica con materiali plastici, il progetto evolve verso una versione metallica robotizzata, più robusta e adatta all'edilizia su scala reale, riducendo materiali, tempi e costi di costruzione.</i>

### 1.3.3 Opportunità e criticità nella stampa 3D di casseforme

La stampa 3D di casseforme, o *digital formworks*, rappresenta una delle più rilevanti innovazioni nel campo delle costruzioni, poiché consente di digitalizzare una delle fasi più complesse e dispendiose del processo edilizio. Questa tecnologia non si limita a sostituire le tecniche tradizionali, ma ne ridefinisce i principi operativi, aprendo la strada a un nuovo paradigma produttivo che coniuga libertà geometrica, sostenibilità materiale e integrazione funzionale. La fabbricazione additiva consente di superare i vincoli imposti dalla modularità e dalla planarità dei sistemi convenzionali, rendendo possibile la creazione di geometrie complesse e di superfici ad alta risoluzione, comprensive di texture e microstrutture che sarebbero irrealizzabili o economicamente insostenibili con i metodi tradizionali. In questo modo, la complessità formale non è più sinonimo di inefficienza produttiva, ma diventa un fattore di ottimizzazione del materiale e di riduzione dell'impatto ambientale.

A differenza della stampa 3D diretta, la realizzazione indiretta attraverso casseforme stampate in 3D offre una maggiore compatibilità con i materiali e le tecniche costruttive tradizionali, consentendo l'uso di calcestruzzi ordinari e armature convenzionali senza richiedere modifiche sostanziali ai processi di cantiere. Tale approccio favorisce una transizione più fluida verso la digitalizzazione del settore, riducendo la discontinuità tra innovazione e prassi. Allo stesso tempo, la libertà geometrica offerta dalla stampa 3D consente di integrare funzioni aggiuntive negli elementi strutturali, come canali di ventilazione, condotti impiantistici o cavità per sensori, ampliando il ruolo del

calcestruzzo da mero materiale strutturale a componente multifunzionale. Progetti come la *HiRes Slab* e la *Funicular Slab* dimostrano come tali integrazioni possano migliorare le prestazioni termiche e ambientali, ottimizzando la distribuzione dei flussi d'aria e di calore e contribuendo alla riduzione dei consumi energetici.

Dal punto di vista ambientale, la stampa 3D di casseforme introduce significativi vantaggi in termini di efficienza dei materiali. Le geometrie ottimizzate consentono di ridurre la quantità di calcestruzzo necessario fino al 70% rispetto alle solette tradizionali, con un conseguente abbattimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> e del peso strutturale. Il caso della *Smart Slab* è emblematico: la lastra stampata in 3D ha registrato un'emissione di 67,04 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> contro i 102,60 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> di una lastra convenzionale, evidenziando come la riduzione del materiale compensi ampiamente l'energia impiegata nella stampa. Inoltre, la possibilità di produrre casseforme ultrasottili mediante estrusione polimerica, con spessori compresi tra 0,4 e 1,2 mm, riduce ulteriormente l'impronta ecologica del processo, garantendo al contempo un'elevata precisione dimensionale e una notevole rigidità strutturale.

Tuttavia, la piena adozione della stampa 3D di casseforme nel settore edilizio è ancora ostacolata da una serie di criticità che riguardano aspetti materiali, strutturali, economici e logistici. Le principali difficoltà derivano dalla vulnerabilità dei materiali utilizzati: le casseforme in PLA, ad esempio, risultano soggette a fenomeni di *Environmental Stress Cracking* (ESC) quando esposte all'ambiente alcalino del calcestruzzo fresco, con conseguenti

perdite di resistenza anche superiori all'80% in tempi molto brevi. Analogamente, i modelli in sabbia ottenuti mediante *binder-jetting* presentano una fragilità intrinseca dovuta alla porosità del materiale, che ne limita la resistenza meccanica e richiede rivestimenti sigillanti multipli per evitare l'adesione del calcestruzzo. L'impiego di materiali alternativi, come ABS, ASA o Nylon, o di rivestimenti epossidici e siliconici, rappresenta una possibile soluzione, ma comporta un incremento della complessità produttiva e dei costi, riducendo i benefici ambientali complessivi.

Dal punto di vista strutturale, la principale criticità riguarda l'integrazione delle armature. Sebbene le casseforme digitali consentano la realizzazione di geometrie ottimizzate, esse complicano l'inserimento delle barre d'acciaio tradizionali, spesso rigide e poco adattabili. Nei casi studio più avanzati, come la *Smart Slab*, la realizzazione di gabbie d'armatura personalizzate ha richiesto un'elevata quantità di manodopera e tempi di assemblaggio molto lunghi, rendendo il processo poco replicabile su scala industriale. Sebbene l'ottimizzazione dei percorsi di stampa possa ridurre tali tempi fino al 50%, la competitività rispetto ai sistemi tradizionali resta limitata, soprattutto in ambiti dove la ripetitività e la velocità sono requisiti fondamentali.

Sul piano logistico, la necessità di suddividere le casseforme in numerosi segmenti per motivi di stampabilità e trasporto introduce problemi di tolleranza e di montaggio. Alcuni prototipi, come la *Smart Slab*, hanno richiesto fino a 181 pezzi distinti, con conseguenti difficoltà di assemblaggio e rischio di dispersione del calcestruzzo durante il getto. Inoltre, la rimozione delle

casseforme, soprattutto nei casi in cui esse siano molto sottili o integrate strutturalmente, può risultare complessa.

In prospettiva, la stampa 3D di casseforme si configura come una tecnologia di transizione tra i processi edilizi tradizionali e la costruzione digitale avanzata. Essa combina libertà formale, sostenibilità e precisione con la possibilità di integrare sistemi funzionali complessi, ridefinendo il rapporto tra forma e performance. Tuttavia, la sua effettiva diffusione dipenderà dalla capacità di superare i limiti attuali attraverso la ricerca di strategie costruttive ibride, capaci di coniugare i vantaggi della fabbricazione digitale con l'affidabilità dei processi convenzionali. In questa prospettiva, il futuro della stampa 3D di casseforme non risiede esclusivamente nell'evoluzione dei materiali o delle macchine, ma nella costruzione di un nuovo modello operativo, in cui progettazione algoritmica, efficienza strutturale e sostenibilità ambientale convergano in un unico sistema integrato di produzione architettonica.

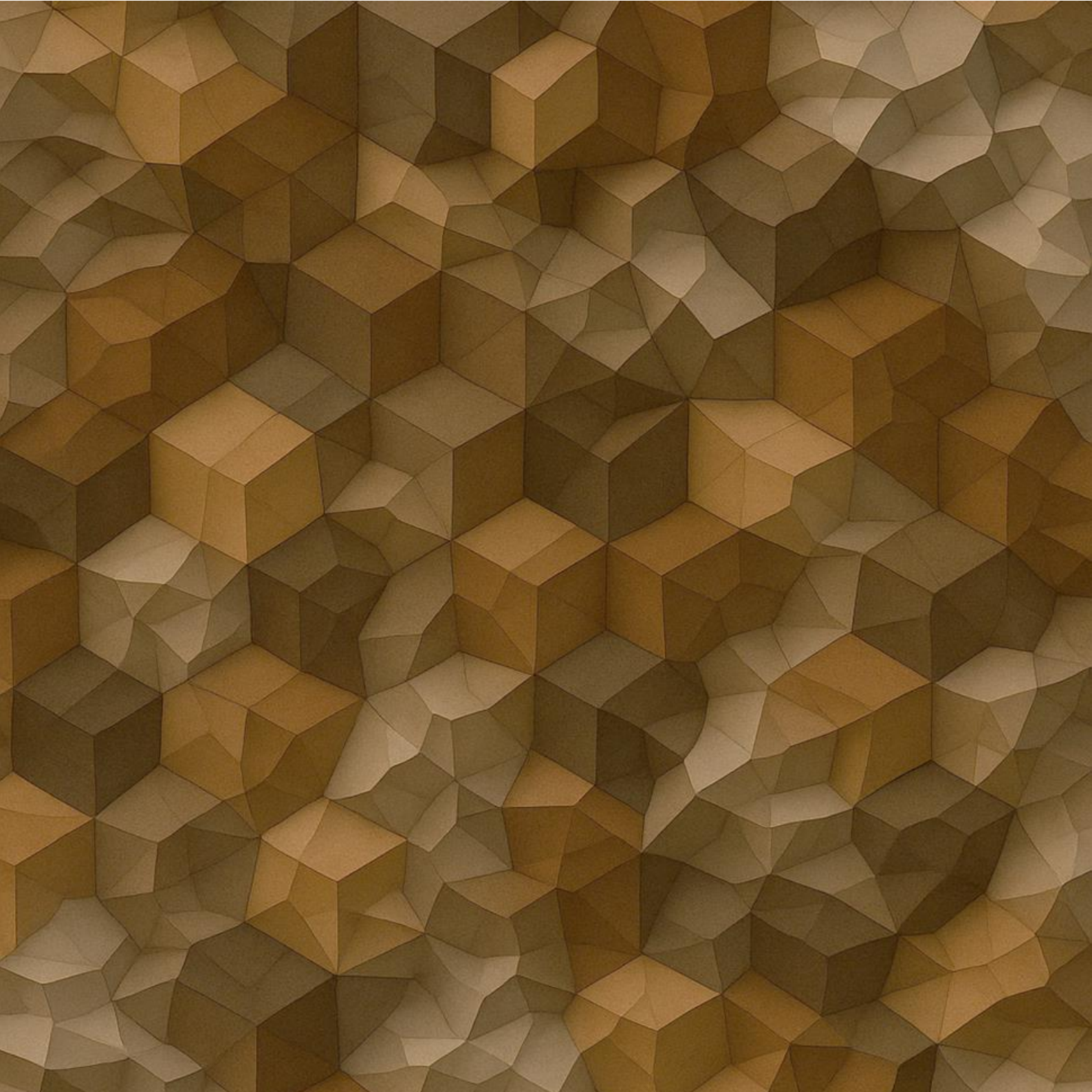
**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione  
architettonica*

**PARTE SECONDA**

# 0.2

## **APPLICAZIONI SPERIMENTALI DI NUOVE FORME**



## **02. APPLICAZIONI SPERIMENTALI DI NUOVE FORME**

Il dibattito sulla rigenerazione urbana e sulla preservazione del paesaggio costruito si è affermato negli ultimi decenni come alternativa concreta al modello di crescita illimitata che ha caratterizzato la città moderna. In questo scenario, la riflessione di Carlo Ratti sulla convergenza tra intelligenza naturale, artificiale e collettiva apre un nuovo orizzonte epistemologico per un'architettura dell'adattamento, orientando il progetto verso il confronto con il patrimonio costruito esistente come ambito privilegiato di sperimentazione.

Questa tensione verso l'adattamento e la trasformazione dell'esistente affonda le sue radici nel cambio di paradigma che, a partire dagli anni Ottanta, ha visto l'esaurimento delle risorse territoriali, il declino dei sistemi produttivi industriali e l'obsolescenza di ampie porzioni di tessuto urbano imporre alla disciplina architettonica una svolta radicale: dalla città intesa come processo di espansione alla città come progetto di trasformazione dell'esistente. Questo passaggio segna la fine dell'occupazione continua del suolo come orizzonte progettuale dominante e inaugura una riflessione centrata sulla densificazione qualitativa, sul riuso, sulla riattivazione di spazi dismessi e sulla ricucitura di tessuti frammentati. Processi che richiedono necessariamente una cooperazione tra saperi diversi e una capacità di integrazione di intelligenze multiple, così come indicato da Ratti.

La questione non è più dove costruire, ma come trasformare: cosa preservare, quali elementi rigenerare, quali dispositivi spaziali siano in grado di riattivare il tessuto urbano dall'interno senza innescare dinamiche speculative né espellere le comunità che lo abitano. In questa prospettiva, il concetto di *territorio poroso* offre una chiave interpretativa centrale, riconoscendo nella frammentazione e nella discontinuità del tessuto urbano contemporaneo non criticità da colmare, ma risorse progettuali da valorizzare.

I vuoti urbani — aree dismesse, margini infrastrutturali, spazi residuali — cessano così di essere letti come assenze o segni di degrado e vengono reinterpretati come opportunità per nuove forme di abitabilità, per connessioni ecologiche e per pratiche di appropriazione collettiva. Rigenerare significa allora intervenire attraverso micro-azioni diffuse, adattabili e contestuali, capaci di lavorare sugli interstizi senza imporre densificazioni omogenee o saturazioni speculative. La permeabilità fisica e sociale del tessuto urbano diventa una qualità progettuale da coltivare, non un problema da risolvere.

Affrontare questa complessità richiede necessariamente un approccio multidisciplinare che integri saperi differenti.

La ricerca qui presentata si è sviluppata proprio attraverso una rete collaborativa che ha coinvolto diversi partner nell'ambito del progetto MICS, finanziato dal PNRR, costruendo una base metodologica condivisa capace di integrare modellazione digitale, sperimentazione materiale e controllo del processo costruttivo.

Il Politecnico di Bari ha coordinato le attività di progetto e curato la ricerca formale e architettonica, indagando le implicazioni morfologiche e spaziali derivanti dall'impiego di sistemi additivi in scala edilizia.

L'Università La Sapienza di Roma ha avviato una linea di ricerca sui materiali naturali e sostenibili, sperimentando l'integrazione di componenti organiche e scarti di lavorazione per la creazione di miscele a basso impatto ambientale.

L'Università Federico II di Napoli ha contribuito con lo sviluppo di sistemi di deposizione robotica mediante braccio antropomorfo, estendendo la scala e la complessità delle geometrie stampabili.

Il Politecnico di Torino ha condotto la ricerca sui mix design per calcestruzzi espansi estrudibili a media densità, sperimentandone pompabilità, estrudibilità e prestazioni meccaniche.

Questa dimensione collaborativa non è accessoria, ma costitutiva della ricerca stessa: solo attraverso l'integrazione di competenze diverse è possibile sviluppare dispositivi costruttivi che siano al tempo stesso tecnologicamente avanzati, materialmente sostenibili e formalmente adattabili.

Per tradurre questo impianto teorico e metodologico in sperimentazione concreta, sono stati sviluppati due dimostratori, progettati dal Prof. Parisi in collaborazione con il gruppo di ricerca del FabLab POLIBA, che indagano modalità differenti di intervento sul tessuto urbano esistente. Entrambi sono stati concepiti come elementi di arredo urbano — specificamente sedute — per

permettere un confronto diretto tra le due tecniche applicate alla medesima tipologia funzionale, mantenendo costanti le variabili d'uso e concentrando l'attenzione sulle implicazioni costruttive, materiche e spaziali di ciascun metodo. La scelta della seduta come caso di studio non è casuale: si tratta di un dispositivo architettonico elementare ma strategico, capace di attivare relazioni sociali, definire luoghi di sosta, qualificare spazi residuali, costituendo l'unità minima di rigenerazione dello spazio pubblico.

Il primo dimostratore — *Vasemode Bench* — adotta un metodo diretto basato sull'estrusione continua in situ mediante tecnologia Liquid Deposition Material, generando forme organiche che si adattano alle specificità morfologiche del contesto e lavorano sulla riconfigurazione dei margini urbani.

Il secondo — *Earth Beehive Bench* — impiega invece un metodo indiretto che utilizza casseforme stampate in 3D per la produzione di moduli prefabbricati in terra cruda stabilizzata, assemblabili a secco, concentrandosi sulla preservazione dell'identità costruttiva locale e sulla reversibilità dell'intervento in contesti storici e paesaggistici sensibili.

Questi due sistemi rappresentano strategie differenti ma complementari per affrontare le sfide della rigenerazione urbana contemporanea: da un lato, la capacità di colonizzare gli interstizi e i vuoti del tessuto consolidato attraverso geometrie fluide e site-specific; dall'altro, la possibilità di intervenire temporaneamente in contesti vincolati con architetture completamente smontabili che rispettano le stratificazioni storiche.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

Attraverso questi approcci — diretto e indiretto — la ricerca dimostra come l'*additive manufacturing* possa contribuire concretamente alla doppia transizione digitale e ambientale, offrendo soluzioni innovative che integrano efficienza tecnologica e memoria culturale, permanenza e reversibilità, radicamento territoriale e adattabilità funzionale.

## 2.1 Stampa Diretta

La storia della stampa 3D applicata all'architettura costituisce un campo di indagine cruciale per comprendere le trasformazioni paradigmatiche che attraversano la disciplina contemporanea. Al di là della dimensione meramente tecnica, la manifattura additiva introduce questioni epistemologiche profonde che investono il rapporto dialettico tra progetto e costruzione, ridefinendo al contempo le categorie morfologiche attraverso cui si articola il linguaggio architettonico.

L'approccio diretto, basato sulla deposizione strato su strato di materiali viscosi come terre, cementi o malte speciali, segna una discontinuità rispetto ai processi costruttivi tradizionali. Se l'architettura si è storicamente basata su logiche di assemblaggio e giustapposizione di elementi discreti, la manifattura additiva propone una concezione alternativa: la configurazione spaziale non deriva più dall'accostamento di parti, ma emerge da un processo continuo di materializzazione, nel quale la materia fluida si solidifica progressivamente durante l'atto costruttivo. La geometria architettonica si configura così come manifestazione diretta del comportamento della materia in condizioni specifiche di estrusione, deposizione e consolidamento, instaurando una relazione causale tra le proprietà fisico-chimiche del materiale, i parametri operativi del sistema e la morfologia risultante.

In questa prospettiva, la stampa 3D diretta restituisce al progetto un carattere processuale e dinamico: le variazioni di densità, spessore o texture diventano parte integrante del linguaggio architettonico. La superficie costruita assume un valore

espressivo inedito, frutto di una coerenza formale che nasce dall'interazione tra materia, gravità e deposizione. Tuttavia, tale processo richiede un controllo estremamente preciso delle proprietà reologiche del materiale e delle condizioni ambientali, per garantire stabilità, coesione e precisione geometrica.

### 2.1.1 Manifattura additiva per forme continue

Per comprendere la genesi delle forme sinuose, delle geometrie autoportanti e delle strategie di gestione degli oggetti che caratterizzano questa disciplina emergente, è necessario risalire non solo alle origini tecniche del processo, ma anche al contesto culturale e teorico che ha reso possibile immaginare la costruzione architettonica come deposizione stratificata di materiale, ribaltando così il paradigma sottrattivo o assemblativo che aveva dominato l'intera storia dell'architettura.

Le radici concettuali della stampa 3D affondano negli anni Ottanta del Novecento, quando l'industria manifatturiera sviluppa le prime tecnologie di prototipazione rapida. Nel 1986 Chuck Hull brevetta la stereolitografia, aprendo la strada a un ecosistema di processi additivi destinati inizialmente alla produzione di modelli, prototipi e piccoli componenti industriali. Questi sistemi operavano su scale ridotte, con volumi di lavoro misurabili in pochi centimetri, utilizzando polimeri fotosensibili o polveri metalliche sinterizzate. L'idea di trasferire questa logica costruttiva alla scala architettonica appariva allora del tutto irrealistica, non solo per le evidenti limitazioni dimensionali, ma soprattutto per la radicale differenza tra i materiali polimerici della prototipazione e quelli da costruzione tradizionali.

Tuttavia, proprio alla fine degli anni Novanta, mentre l'architettura contemporanea attraversava una profonda trasformazione sotto l'impulso della digitalizzazione progettuale e dell'emergere di un linguaggio formale organicista ispirato dal biomorfismo e dalla topologia, iniziarono a prendere forma le prime sperimentazioni volte a colmare questo salto di scala.

Tra le prime ricerche si colloca il lavoro di Behrokh Khoshnevis, docente alla University of Southern California, che all'inizio degli anni Duemila sviluppa il sistema Contour Crafting. Il suo brevetto, depositato nel 1996 e perfezionato negli anni successivi, introduce per la prima volta l'idea di una stampante su larga scala in grado di estrarre calcestruzzo in strati sovrapposti, controllata da un braccio robotico. L'obiettivo non era soltanto sperimentale: Khoshnevis immaginava un processo di costruzione automatizzato, capace di ridurre tempi, costi e rischi nei cantieri, soprattutto in contesti di emergenza o in ambienti extraterrestri.

Quasi in parallelo, in Europa, l'ingegnere Enrico Dini porta avanti un approccio radicalmente diverso con il progetto D-Shape, basato sulla sinterizzazione di sabbia mediante leganti inorganici. La sua macchina, sviluppata in Italia a partire dal 2004, apre nuove prospettive in termini di libertà formale e precisione geometrica, proponendo un processo più affine alla pietra artificiale che al getto di calcestruzzo.

Queste due linee di ricerca — l'estrusione continua di materiali cementizi e la solidificazione selettiva di materiali— costituiscono le matrici tecnologiche da cui si svilupperà l'intero campo della stampa 3D per l'architettura. Entrambe nascono da una

medesima tensione culturale: quella di trasferire le logiche della fabbricazione digitale dal mondo del modello a quello dell'edificio reale, costruendo direttamente dal modello digitale ed eliminando le mediazioni tradizionali del processo costruttivo.

Se nelle prime fasi l'interesse era concentrato sugli aspetti ingegneristici, ben presto emerse un'ulteriore questione: quella formale. Le implicazioni tecnologiche della deposizione stratificata non si limitavano a introdurre nuove tecniche costruttive, ma generavano una vera e propria grammatica morfologica inedita, capace di ridefinire la forma architettonica a partire dal processo stesso di costruzione.

Dal punto di vista formale, questa tecnica favorisce la creazione di superfici continue caratterizzate da fluidità e dinamismo, generate attraverso traiettorie programmate digitalmente che traducono equazioni matematiche in geometrie materiali. La forma non è più un disegno da realizzare, ma l'esito diretto di un processo di deposizione controllato, nel quale i vincoli fisici e reologici del materiale assumono un ruolo generativo.

È in questo contesto che la ricerca architettonica inizia a confrontarsi con il tema delle geometrie autoportanti e delle strategie di gestione degli oggetti, che diventano non solo problemi tecnici, ma vere e proprie questioni di linguaggio.

L'architettura stampata non imita più la costruzione tradizionale: la reinventa, traducendo la fisica del materiale in espressione formale.

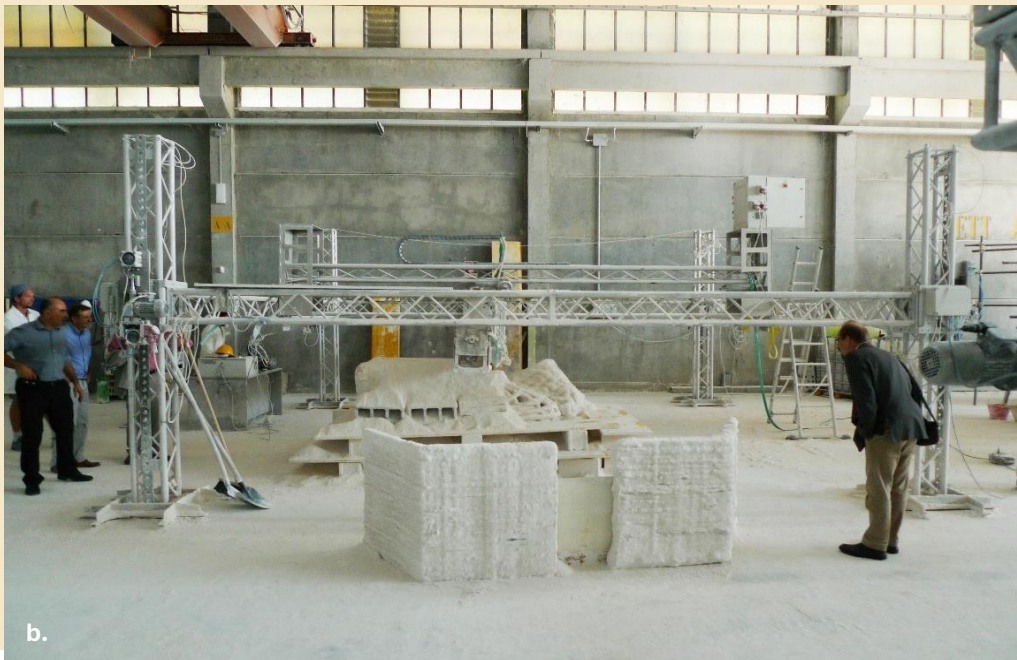


*Alla pagina seguente:  
Fig.12  
a. ContourCrafting  
Technology*

*©<https://www.cbinsights.com/company/contour-crafting-corporation>*

*b. D-Shape 3D  
Printing Technology*

*©<https://3dprint.com/27229/d-shape-3d-printed-military/>*



Questa nuova grammatica costruttiva, fondata sulla deposizione progressiva dal basso verso l'alto, introduce tuttavia un vincolo fisico fondamentale dalle profonde conseguenze morfologiche: la necessità che ogni strato sia sostenuto da quello sottostante. L'impossibilità di depositare materiale "nel vuoto" impone infatti una logica di crescita per continuità, che condiziona la generazione delle forme e obbliga a ripensare il rapporto tra gravità, materia e geometria. È il problema delle sporgenze (*overhangs*), uno dei principali nodi tecnici della stampa 3D su scala architettonica, la cui gestione richiede un dialogo costante tra progettazione digitale e comportamento fisico del materiale.

Per le miscele cementizie normalmente impiegate, la stabilità dello strato fresco è garantita solo entro determinati angoli di inclinazione rispetto alla verticale — generalmente compresi tra 30° e 45°, in funzione della viscosità, della velocità di estrusione e delle condizioni di presa. Oltre questi limiti, la forza di gravità prevale sulla coesione del materiale, causando deformazioni o collassi locali. Tale vincolo, lungi dal rappresentare una limitazione puramente tecnica, diventa un principio generativo, poiché impone la ricerca di forme che si sostengano da sé durante la crescita.

Nascono così morfologie autoportanti, in cui l'equilibrio statico è inscritto nella logica stessa della forma. Le pareti assumono profili leggermente inclinati, le coperture si sviluppano come superfici a guscio o a volta, e le transizioni tra elementi strutturali avvengono senza discontinuità, secondo curvature che redistribuiscono gradualmente le sollecitazioni.

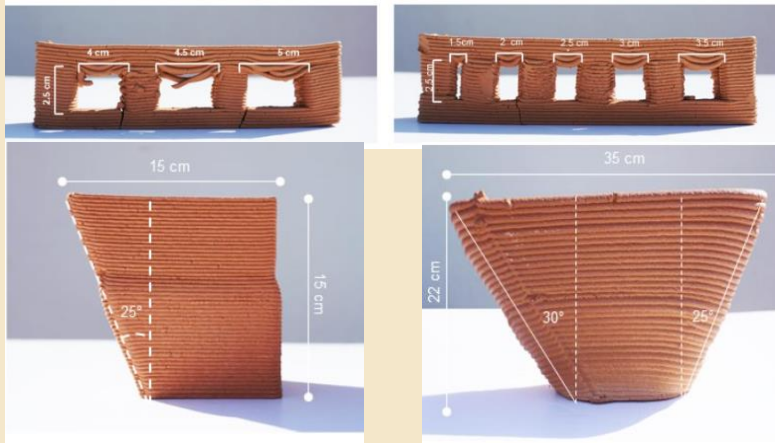
La sperimentazione "*Openings In 3d Printing With Earth*" dello IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) esemplifica questo approccio indagando i limiti morfologici della stampa 3D in terra cruda, in particolare nella realizzazione di aperture autoportanti. Attraverso una serie di prototipi sperimentali, il gruppo di ricerca esplora come la variazione parametrica dell'inclinazione degli strati, consenta di generare aperture autoportanti che emergono direttamente dalla logica stratificata del processo. Le geometrie risultanti — caratterizzate da archi ribassati, profili catenari e transizioni continue tra pieno e vuoto — dimostrano come il vincolo gravitazionale possa trasformarsi in un criterio di ottimizzazione formale, dal quale scaturiscono configurazioni strutturalmente efficienti e morfologicamente espressive.

In questa prospettiva, la geometria non è più definita a priori, ma emerge come risultato dell'interazione tra gravità, deposizione e presa del materiale. Non è più la forma a determinare il processo, bensì il processo a generare la forma, restituendo alla materia un ruolo attivo nella definizione dello spazio e rendendo il progetto un sistema capace di evolvere secondo logiche fisiche proprie del materiale.

Tuttavia, questa logica di continuità e crescita incontra un limite concreto nel passaggio dalla scala del laboratorio a quella dell'architettura costruita. È proprio nel passaggio dal prototipo all'edificio che emergono le prime tensioni tra potenzialità teorica e fattibilità operativa, rivelando la presenza di vincoli tecnici, logistici e dimensionali che ne condizionano l'applicazione su larga scala.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*





Alla pagina  
precedente:

Fig. 13  
*OPENINGS IN 3D  
PRINTING WITH  
EARTH*, JingWen  
Chiou, Christofer  
Bierach — IAAC,  
Barcellona, 2019–  
2020

©<https://www.iaacbl.org.com/programs/openings-3d-printing-earth/>

La stampa 3D diretta opera, infatti, attraverso dispositivi robotici o gantry la cui dimensione fisica determina il volume massimo dell'oggetto stampabile. Questo limite nasconde una questione economica e logistica di portata fondamentale: scalare il sistema di stampa in funzione delle dimensioni del progetto risulta economicamente insostenibile. Costruire una stampante monumentale per ogni edificio di grandi dimensioni contraddirebbe proprio quei principi di efficienza, serialità e ottimizzazione che dovrebbero rendere la manifattura additiva competitiva rispetto ai metodi costruttivi tradizionali.

Si apre così una dicotomia concettuale che attraversa l'intera disciplina della stampa 3D architettonica: da un lato, la promessa di una costruzione continua, monolitica, priva di giunti, in cui la forma emerge come entità organica e indivisibile; dall'altro, la necessità pragmatica di reintrodurre la logica dell'assemblaggio, frammentando l'architettura in componenti modulari che possano essere prodotti separatamente e poi assemblati in loco. Il progetto Tor Alva, inaugurato nel maggio 2025 nelle Alpi svizzere, costituisce una delle manifestazioni più emblematica di questa strategia ibrida. Progettata dagli architetti Michael Hansmeyer e Benjamin Dillenburger in collaborazione con l'ETH di Zurigo, la torre — alta 30 metri — rappresenta la più grande struttura stampata in 3D mai realizzata. È costituita da 32 colonne uniche distribuite su quattro livelli, che culminano in una cupola destinata a ospitare uno spazio performativo. Ciò che rende Tor Alva un caso paradigmatico non è soltanto l'altezza raggiunta, ma il metodo con cui tale altezza è stata ottenuta. I componenti principali sono stati prodotti separatamente presso il campus ETH

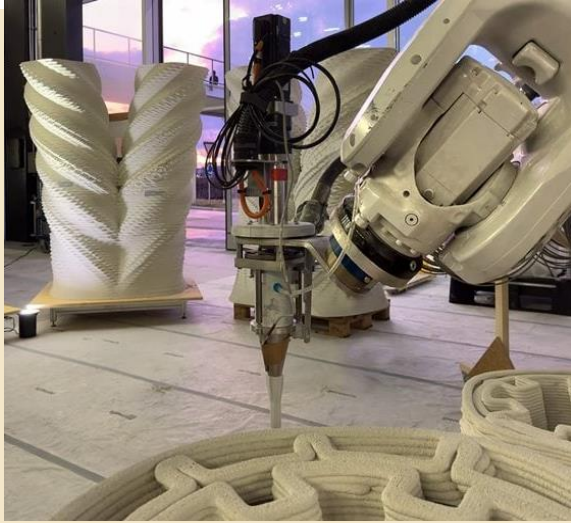
nel corso di cinque mesi, quindi trasportati e assemblati in loco. Le colonne, caratterizzate da geometrie ramificate e superfici ornamentali complesse generate algebricamente, sono state connesse utilizzando viti rimovibili e cavi di post-tensionamento, che ne consentono il futuro smontaggio e la ricollocazione. Questa scelta introduce un principio di reversibilità costruttiva: l'edificio diventa temporaneo per vocazione, concepito sin dall'origine per essere disassemblato e ricollocato, trasformandosi in un sistema di componenti riutilizzabili. La modularità non è più soltanto una soluzione al problema della scala, ma diventa strategia di sostenibilità e adattabilità nel tempo.

Dal punto di vista strutturale, Tor Alva affronta una delle sfide più critiche della stampa 3D architettonica: la realizzazione di elementi portanti con rinforzi in acciaio inseriti durante il processo robotico di produzione. Un secondo robot inserisce un elemento di rinforzo a forma di anello nella colonna in crescita ogni 26 centimetri di altezza, permettendo la produzione di colonne complesse e ramificate che sarebbero difficili da realizzare con un processo di getto convenzionale. Questo sistema di "armatura che cresce" risolve il problema del rinforzo strutturale senza compromettere la libertà formale, mantenendo al contempo la continuità del processo additivo. La geometria delle colonne — sottili, cave, ramificate — risponde a una logica di ottimizzazione materiale: il calcestruzzo è impiegato solo dove necessario, riducendo massa e sprechi. La forma non è espressione estetica autonoma, ma esito di un calcolo prestazionale che distribuisce la materia in modo funzionale alle sollecitazioni.



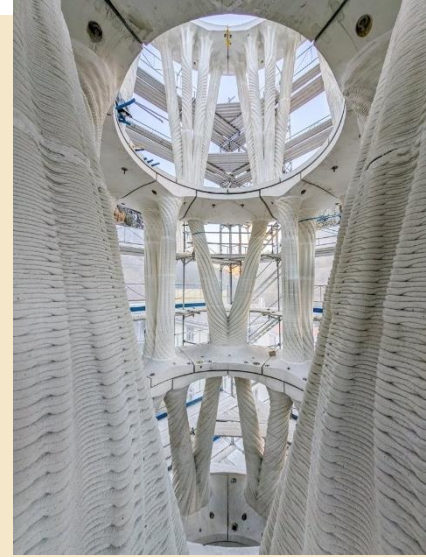
*Alla pagina seguente:  
Fig.14  
TOR ALVA, (White  
Tower), Michael  
Hansmeyer e  
Benjamin  
Dillenburger — ETH  
Zurich, Mulegns,  
Svizzera, 2025*

*©<https://www.tor-alva.ch/en/architecture/>*



**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



Tuttavia, questa strategia modulare non rappresenta un ritorno alla prefabbricazione industriale. A differenza dei sistemi tradizionali, basati sulla ripetizione di elementi standardizzati, la stampa 3D consente la produzione di componenti unici e non-standard senza costi aggiuntivi. Ogni colonna di Tor Alva è diversa dalle altre, generata attraverso algoritmi che combinano logica strutturale e ornamento in un'unica entità formale. La modularità diventa così serialità della diversità, in cui l'assemblaggio non implica uniformità, ma composizione di singolarità.

Questa serialità della diversità conduce direttamente a una delle questioni teoriche più rilevanti introdotte dalla stampa 3D: il principio della "complessità gratuita". Nell'architettura tradizionale, la complessità formale ha sempre comportato un costo economico proporzionale: una curva richiede casseforme sagomate, un ornamento implica lavorazioni aggiuntive e stampi dedicati. Questa relazione diretta tra complessità geometrica e incremento dei costi ha storicamente condizionato il linguaggio architettonico, favorendo le forme elementari non tanto per superiorità strutturale, quanto per convenienza economica.

La stampa 3D sovverte radicalmente questa relazione: nel processo additivo digitale, stampare una parete curva o una superficie ornata richiede lo stesso tempo e materiale di una parete piana, poiché ciò che varia è soltanto la traiettoria dello strumento. Le geometrie elementari smettono di essere privilegiate, lasciando spazio a configurazioni fluide in cui le pareti si deformano secondo gradienti continui, gli angoli si trasformano in raccordi curvilinei, e l'architettura assume un carattere di continuità e metamorfosi.

Questo paradigma si intreccia con le logiche dell'ottimizzazione topologica: algoritmi che distribuiscono la materia solo dove necessario, generando forme che sembrano crescere come organismi naturali. Forme che un tempo sarebbero state economicamente proibitive diventano realizzabili con lo stesso impegno produttivo di una struttura semplice, in una condizione in cui efficienza materiale, espressione formale e ottimizzazione strutturale coincidono.

La stampa 3D inaugura così una nuova etica progettuale, fondata sull'integrazione tra calcolo, materia e forma. L'architettura non imita più la natura, ma ne adotta i principi generativi, traducendoli in un linguaggio costruttivo che unisce logica, prestazione e bellezza.





*Alla pagina  
precedente:*

*Fig.15  
Braccio robotico  
Etesias*

*©Vasemode Bench.  
Progetto MICS 6.10,  
coordinamento  
scientifico: Prof. N.  
Parisi.*

*Collaborazioni:  
Sapienza Università  
di Roma, Politecnico  
di Torino, Università  
degli Studi di Napoli  
Federico II.*

### 2.1.2 Il contesto della ricerca

La presente ricerca si inserisce nell'ampio scenario internazionale che indaga la trasferibilità della stampa 3D su scala architettonica, con particolare attenzione ai materiali cementizi e terrosi come alternative sostenibili ai sistemi costruttivi tradizionali.

Il progetto si è sviluppato attraverso una rete di collaborazione scientifica nell'ambito del progetto MICS, finanziato da PNRR, che ha coinvolto diversi partner: il Politecnico di Bari ha coordinato le attività di progetto e curato la ricerca formale e architettonica del dimostratore, indagando le implicazioni morfologiche e spaziali derivanti dall'impiego di sistemi additivi in scala edilizia.

La fase di produzione del dimostratore è stata realizzata presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli e la sua società spin-off Etesias s.r.l., che hanno messo a disposizione un sistema di deposizione robotica costituito da un braccio antropomorfo ABB a 6 gradi di libertà. Questa rete collaborativa ha permesso di costruire una base metodologica condivisa e interdisciplinare, capace di integrare modellazione digitale, sperimentazione materiale e controllo del processo costruttivo, delineando il contesto tecnico-scientifico entro cui si colloca il dimostratore architettonico sviluppato nella presente ricerca come esito critico e sperimentale volto a esplorare le potenzialità della manifattura additiva nel ridefinire i rapporti tra forma, materia e costruzione.

### 2.1.3 Il dimostratore architettonico

Vasemode Bench è un dimostratore di manifattura additiva diretta applicata alla scala dell'arredo urbano, si configura come una seduta urbana continua e multifunzionale, progettata e realizzata mediante estrusione diretta di materiale cementizio attraverso sistemi di fabbricazione digitale robotica.<sup>2</sup>

Il dimostratore nasce con l'obiettivo di indagare le potenzialità della produzione additiva continua nel superamento dei modelli industriali di tipo seriale, introducendo logiche progettuali basate sulla personalizzazione parametrica e sull'ottimizzazione del rapporto tra geometria, materiale e processo costruttivo. Non è concepito come un oggetto isolato, ma come un sistema generativo in cui la forma emerge dall'interazione tra vincoli tecnologici, proprietà reologiche del materiale e parametri geometrici variabili, rendendo il progetto intrinsecamente adattabile a differenti contesti urbani.

Dal punto di vista tecnologico, il prototipo sperimenta una strategia di stampa in modalità "*vase mode*", caratterizzata da un percorso di deposizione continuo e privo di interruzioni o retrazioni. Tale approccio, derivato dalle pratiche di stampa additiva di piccoli manufatti, viene qui reinterpretato e scalato alla dimensione architettonica, consentendo una continuità formale e materica che riduce le discontinuità costruttive, ottimizza l'uso

---

<sup>2</sup> Il dimostratore Vasemode Bench è il risultato di una ricerca progettuale elaborata nel progetto MICS e coordinata dal Prof. Nicola Parisi e da un gruppo di ricerca di cui la sottoscritta ha fatto parte in qualità di dottoranda e composto anche da Daniele Colapinto, Angelo Vito Graziano, Vincenza Savino.

del materiale e migliora l'efficienza complessiva del processo di fabbricazione.

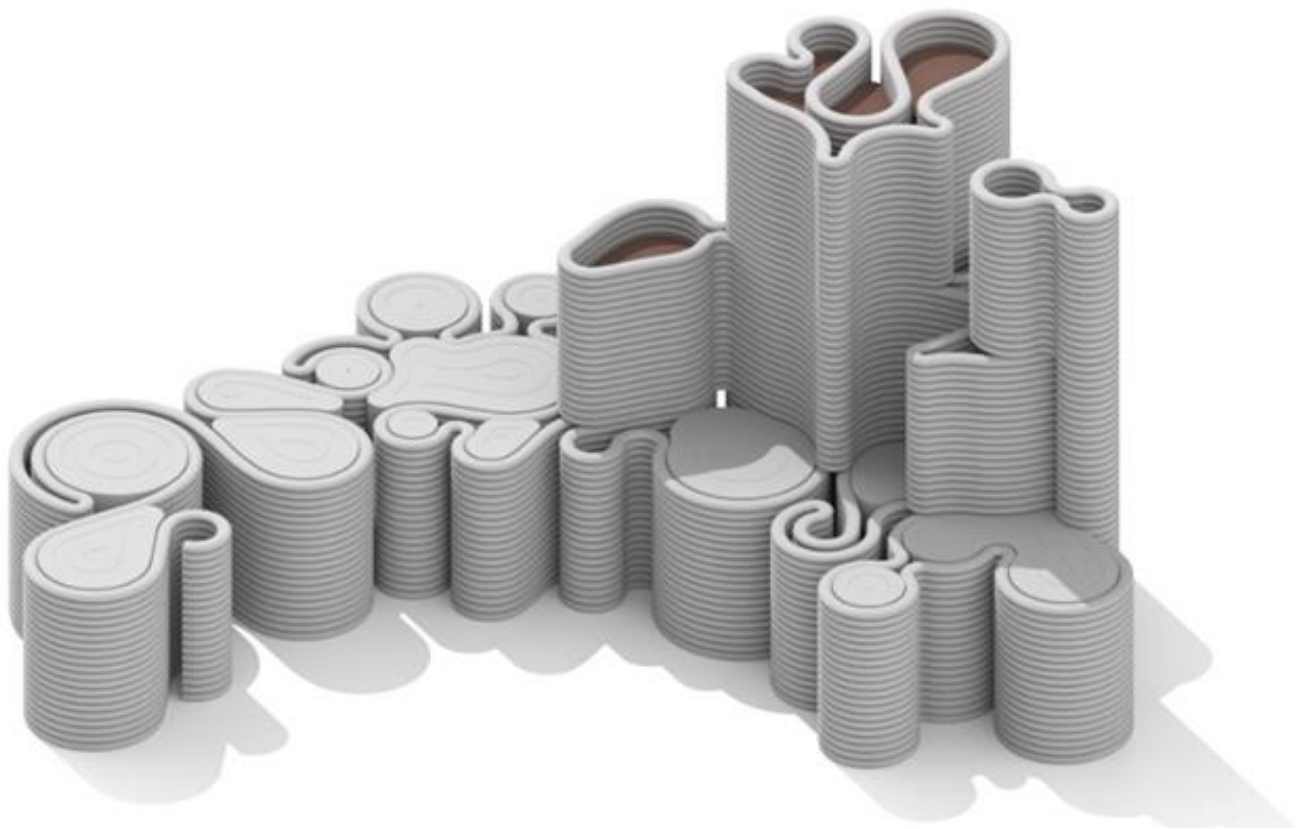
Sotto il profilo funzionale, il *Vasemode Bench* integra in un unico organismo diverse funzioni urbane — seduta, contenimento e supporto per vegetazione — configurandosi come un dispositivo urbano ibrido. L'arredo non è quindi inteso come semplice elemento di servizio, ma come interfaccia attiva tra corpo, spazio pubblico e ambiente, capace di attivare pratiche di uso, permanenza e socialità. In questo senso, il dimostratore assume il valore di strumento di micro-rigenerazione urbana, attraverso il quale la manifattura additiva viene indagata come mezzo per ridefinire i rapporti tra forma, materia e costruzione nella città contemporanea.

Dal punto di vista metodologico, il *Vasemode Bench* costituisce un banco di prova per un approccio progettuale che integra modellazione digitale, comportamento del materiale e processo costruttivo. La geometria non è definita a priori in termini puramente formali, ma è il risultato di una negoziazione continua tra modello digitale, comportamento del materiale allo stato fresco e capacità del sistema robotico di eseguire traiettorie complesse con elevata precisione. In questo senso, il dimostratore consente di esplorare un approccio progettuale in cui la fabbricazione non rappresenta una fase esecutiva successiva, bensì una componente integrata del processo di progetto, capace di influenzarne in modo sostanziale gli esiti spaziali, strutturali e ambientali.

Il processo progettuale è stato formalizzato attraverso uno script parametrico sviluppato in Grasshopper, plug-in per Rhinoceros 3D, seguendo un flusso di lavoro digitale che valida la continuità della catena file-to-production.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV. 04-** Vista del dimostratore Vasemode Bench- ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

La scelta di un sistema parametrico non risponde soltanto a esigenze di controllo geometrico, ma riflette una precisa strategia progettuale volta a generare configurazioni spaziali capaci di adattarsi alla complessità e alla variabilità dei contesti urbani.

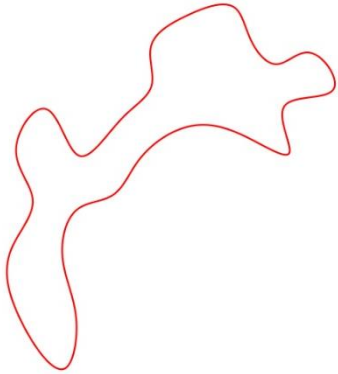
La definizione geometrica della seduta si basa su una curva poli-arco continua e aperta, i cui raggi costituiscono i parametri variabili del sistema. Questa logica generativa parte dall'identificazione dell'area di ingombro, definita in relazione alle specifiche necessità del contesto urbano di riferimento. (Tav05.a) L'area viene quindi popolata con una serie di cerchi tangenti di raggi variabili, di dimensioni ottimizzate per rispondere simultaneamente a requisiti ergonomici e funzionali. (Tav05.b)

Attraverso connessioni concentriche o tangenti tra questi cerchi, si costruisce una curva poli-arco continua che funge da sistema generativo dell'intera configurazione. Questo approccio consente di definire tre percorsi curvilinei disposti a quote differenti — rispettivamente 0,50 metri, 1,00 metri e 1,50 metri — ciascuno dei quali è rappresentato da una distinta curva poli-arco che integra molteplici funzioni: seduta alla quota inferiore, contenimento a quella intermedia, aggregazione e supporto vegetale a quella superiore. (Tav05.c-d-e)

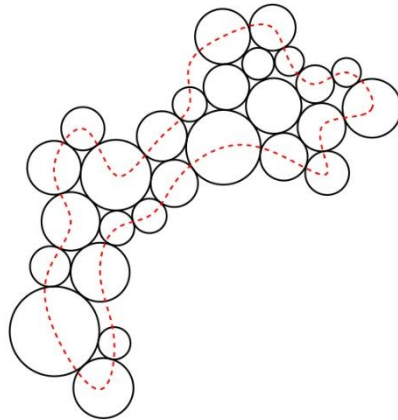
La configurazione spaziale che ne risulta non deriva dall'accostamento di parti discrete, ma emerge da un processo continuo di materializzazione nel quale la materia fluida si solidifica progressivamente durante l'atto costruttivo.

**Mariangela Lops**

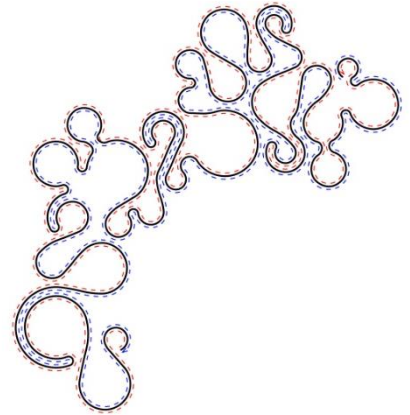
*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**a.** Definizione dell'impronta

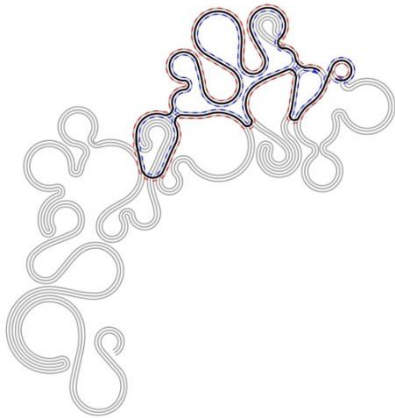


**b.** Generazione di cerchi

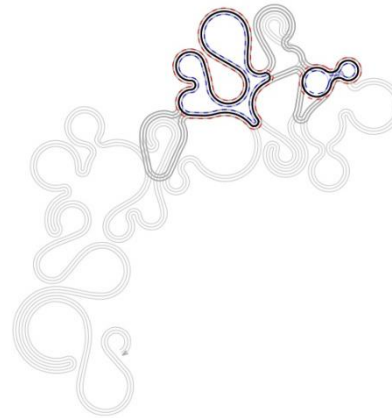


**c.** Percorso curvilineo a +0,5 m

**TAV. 05-** Processo costruttivo Vasemode Bench- ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



**d.** Percorso curvilineo a +1 m



**e.** Percorso curvilineo a +1,5 m

#### 2.1.4 Applicazione pratica: realizzazione del prototipo Vasemode Bench

Nell'ambito del Wrap-up Meeting del Progetto 6.10 "*The direct/indirect use of additive manufacturing in construction viscous mixtures*", tenutosi presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e la società spin-off Etesias s.r.l. nei giorni 11-12 dicembre 2025, è stata condotta la fabbricazione additiva del prototipo denominato "Vasemode Bench".

Il sistema di deposizione robotica impiegato per la realizzazione del prototipo consisteva in un braccio antropomorfo ABB a 6 gradi di libertà, integrato con un sistema di pompaggio continuo costituito da una pompa centrifuga CONNECT P50 3DCP prodotta da M-TEC Mathis Technik, specificatamente progettata per la gestione di materiali cementizi e massetti autolivellanti ad elevata viscosità. La pompa a leva, collegata direttamente al braccio robotico, ha garantito un flusso costante e controllato del materiale durante l'intero processo di deposizione.

La miscela cementizia utilizzata era i.tech 3D N<sup>3</sup>, un premiscelato sviluppato da Heidelberg Materials (*Italcementi*) e formulato espressamente per applicazioni di manifattura additiva mediante estrusione.

---

<sup>3</sup> La scheda tecnica del materiale cementizio utilizzato (i.tech 3D R), fornita da Heidelberg Materials per applicazioni di stampa 3D, è disponibile sul sito ufficiale della società alla pagina dedicata alla tecnologia di stampa 3D del calcestruzzo: <https://www.heidelbergmaterials.it/it/tecnologia-3d-printing>



Alla pagina seguente:  
Fig.16

**a.** Braccio robotico ABB con 6 gradi di libertà dotato di estrusore custom per malte cementizie

**b.** Sistema di pompaggio continuo: pompa centrifuga CONNECT P50 3DCP prodotta da M-TEC Mathis Technik

© Vasemode Bench |  
Progetto MICS 6.10



Il materiale, composto da cemento e aggregati selezionati con granulometria 0-2 mm, presenta caratteristiche reologiche ottimizzate per garantire contemporaneamente la capacità di autosostenersi durante la stampa mantenendo la forma geometrica progettata e un'adeguata lavorabilità durante il processo di estrusione. Precedentemente all'esecuzione della stampa, il gruppo di ricerca ha sottoposto la miscela Heidelberg Materials a un protocollo di controllo qualità articolato, finalizzato a verificare la conformità delle caratteristiche del materiale ai requisiti del processo di manifattura additiva.

La prima verifica ha riguardato la determinazione del contenuto d'acqua mediante metodo gravimetrico. Attraverso pesate del campione prima e dopo l'essiccazione in forno a microonde, è stato verificato che il rapporto acqua/cemento corrispondesse ai valori di progetto. Questo parametro risulta critico in quanto variazioni nel contenuto d'acqua possono compromettere significativamente le capacità di pompaggio ed estrusione del materiale attraverso l'ugello di deposizione.

### **Test di consistenza del materiale fresco**

Successivamente sono stati eseguiti test standardizzati per la caratterizzazione della consistenza del materiale allo stato fresco.

Lo **slump test** (prova di abbassamento al cono) ha fornito una misura immediata della fluidità del materiale. Il test prevede il riempimento di un cono tronco normalizzato con il calcestruzzo fresco e la successiva misurazione dell'abbassamento verticale del campione dopo la rimozione dello stampo.

Il **flow table test** (prova alla tavola a scosse) è stato condotto posizionando il campione su una tavola metallica normalizzata, sottoposta a 15 cicli di sollevamento e caduta controllata. La misura del diametro della configurazione finale del campione ha fornito un indicatore quantitativo della fluidità. Un diametro compreso tra 180 e 240 mm è stato identificato come range ottimale, indicativo di un materiale sufficientemente fluido per essere estruso ma con proprietà reologiche adeguate a prevenire il collasso dopo la deposizione.

Di particolare rilevanza per le applicazioni di stampa 3D è risultato lo **slug test**, utilizzato per la determinazione dello yield stress del materiale. La procedura prevede l'estrusione del materiale attraverso l'ugello e la raccolta sequenziale dei segmenti di materiale depositato ("slugs") in un contenitore posto su bilancia analitica. Dalla pesata di 25 slugs consecutivi è stato derivato il valore di yield stress, parametro che quantifica la resistenza del materiale allo scorrimento plastico.

Questo parametro deve soddisfare un equilibrio critico: valori eccessivamente bassi determinano l'instabilità degli strati depositati con conseguente collasso della struttura; valori eccessivamente elevati impediscono l'estrusione del materiale attraverso l'ugello. Durante l'esecuzione del test è stata inoltre verificata l'uniformità della lunghezza dei segmenti estrusi (circa 150 mm), indicatore della consistenza del processo di estrusione.

Il tempo di lavorabilità (open time) è stato monitorato mediante ripetizioni del flow table test a intervalli di 15 minuti. La riduzione del diametro di circa 30 mm rispetto al valore iniziale è stata

identificata come indicatore del limite oltre il quale il materiale non è più adeguato al processo di stampa. L'intervallo di lavorabilità deve essere compatibile con la durata pianificata del processo di stampa, garantendo un'adeguata velocità di irrigidimento per sostenere gli strati successivi senza causare occlusione dell'ugello. Infine, sono stati determinati la densità del materiale fresco e il contenuto d'aria occlusa. I valori target identificati sono compresi tra 1,9 e 2,2 g/cm<sup>3</sup> per la densità e tra il 2% e il 5% per il contenuto d'aria. Questi parametri garantiscono un compromesso ottimale tra facilità di pompaggio e prestazioni meccaniche del materiale indurito.

I risultati complessivi del protocollo di controllo qualità hanno confermato che la miscela Heidelberg Materials possedeva le caratteristiche reologiche e fisiche richieste per procedere con la stampa del prototipo "Vasemode Bench", assicurando la fattibilità del processo di deposizione e il raggiungimento delle proprietà meccaniche target.

Precedentemente all'esecuzione della stampa, il file digitale di controllo è stato sottoposto a un processo di ottimizzazione finalizzato all'adattamento al processo di manifattura additiva. Il gruppo di ricerca ha revisionato il file in formato .3dm (formato nativo dell'ambiente CAD Rhinoceros), implementando modifiche alle traiettorie di deposizione e identificando i punti critici del percorso utensile.

Particolare attenzione è stata dedicata all'analisi delle zone in cui la geometria del prototipo richiedeva transizioni complesse o variazioni direzionali significative, potenzialmente problematiche

per la qualità del processo di deposizione. Durante questa fase di ottimizzazione sono stati individuati specifici segmenti definiti "bridge" – tratti in cui il materiale estruso deve attraversare una discontinuità geometrica senza supporto sottostante – che, pur costituendo una criticità tecnica, non potevano essere eliminati per preservare l'integrità estetica del design. (Tav.07)

Per assicurare la stabilità strutturale in corrispondenza di questi punti critici senza compromettere l'aspetto finale dell'artefatto, è stata pianificata l'integrazione di una rete di rinforzo in fibra di vetro. Questa soluzione ha permesso di mantenere la stabilità geometrica durante la deposizione del materiale garantendo al contempo la continuità estetica del prototipo.

La fase di preparazione digitale, comprensiva della revisione delle traiettorie e della pianificazione degli interventi di rinforzo, si è rivelata determinante per assicurare la continuità e il controllo del processo di stampa, minimizzando il rischio di difetti o interruzioni durante la deposizione del materiale.

L'ancoraggio del prototipo alla piattaforma di supporto è stato ottenuto mediante una soletta di fondazione in calcestruzzo dello spessore di 200 mm, all'interno della quale sono stati posizionati strategicamente tondini in acciaio per il collegamento strutturale (Tav. 06).

I tondini di armatura sono stati disposti in modo da emergere dalla superficie della soletta in corrispondenza degli interstizi della geometria stampata, consentendo l'inserimento degli elementi metallici all'interno della struttura del prototipo senza comprometterne l'integrità formale. Questa configurazione ha permesso di realizzare un'interfaccia strutturale efficace tra la fondazione in calcestruzzo gettato in opera e il componente realizzato mediante manifattura additiva, ottimizzando la trasmissione delle sollecitazioni meccaniche e garantendo un ancoraggio stabile al suolo.

Il processo di manifattura additiva del prototipo "Vasemode Bench" è stato strutturato secondo una strategia di deposizione multi-fase, articolata in tre sessioni consecutive corrispondenti a differenti quote altimetriche del dimostratore. Questa suddivisione del processo è stata definita in base a considerazioni sia tecnologiche che strutturali, finalizzate a garantire la stabilità geometrica durante la costruzione e l'integrità meccanica del componente finale.



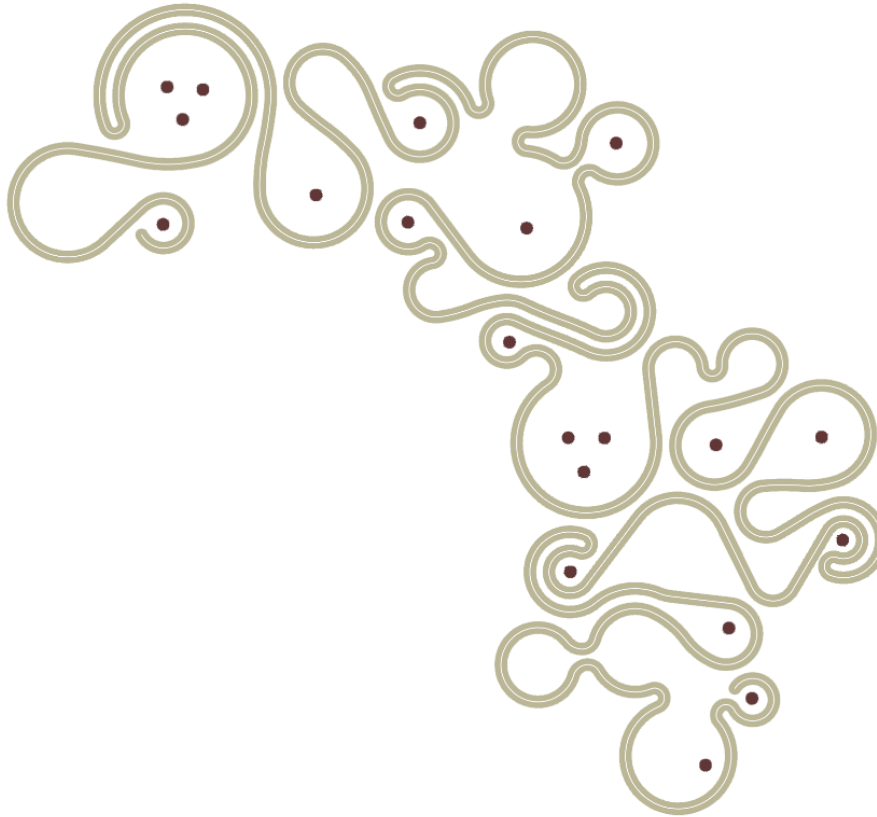
*Alla pagina seguente:  
Fig.17  
Fase preparatoria del  
Vasemode Bench*

*©Vasemode Bench |  
Progetto MICS 6.10*

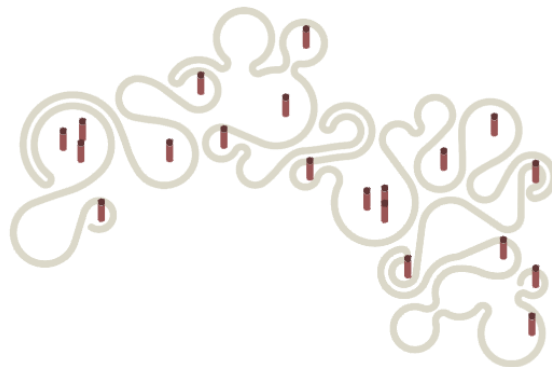


**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.06**-Planimetria livello 0 - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



**TAV.07-** Assonometria livello 0 - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

La fase iniziale del processo ha rappresentato la porzione più estesa dell'intera sessione di stampa, con una durata di circa 60 minuti. Durante questo intervallo temporale, il sistema robotico ha depositato il materiale secondo le traiettorie programmate attraverso 50 layers consecutivi, fino al raggiungimento di un'altezza di 500 mm dal piano di fondazione. Questa configurazione corrisponde a un'altezza nominale di layer pari a 10 mm, valore che rappresenta un compromesso ottimale tra velocità di produzione e qualità dimensionale del componente.

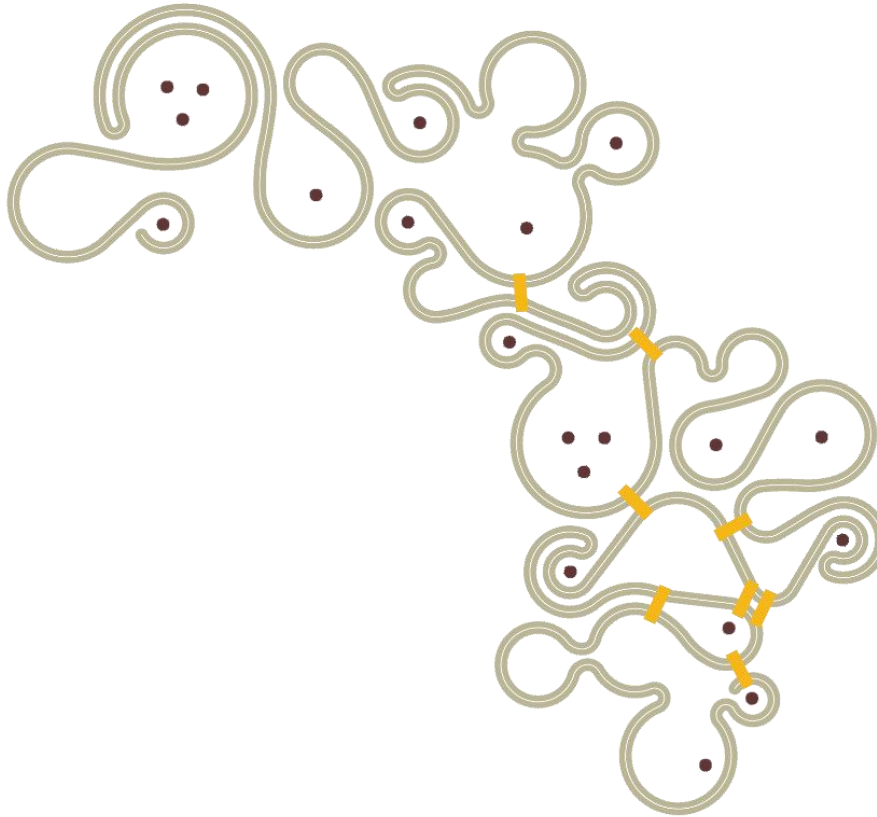
La deposizione di 50 layers in 60 minuti implica un tempo medio di deposizione di circa 1,2 minuti per layer, ritmo che deve essere mantenuto costante per garantire l'uniformità delle proprietà interfacciali tra gli strati consecutivi. La durata relativamente estesa di questa fase ha inoltre richiesto una gestione ottimale del tempo di lavorabilità della miscela i.tech 3D N, che presenta un open time di 28 minuti secondo le specifiche tecniche, rendendo necessario un approvvigionamento continuo di materiale fresco attraverso il sistema di pompaggio.

Al completamento della prima fase di deposizione, il processo è stato temporaneamente interrotto per consentire l'integrazione di punti di rinforzo. In corrispondenza dei punti critici precedentemente identificati durante la fase di ottimizzazione del percorso utensile – in particolare nelle zone di "bridge" dove la geometria presenta discontinuità o attraversamenti senza supporto sottostante – sono state applicate bande di rete in fibra di vetro. Successivamente all'integrazione del rinforzo, il processo di stampa è stato ripreso per la deposizione della seconda porzione del prototipo, costituita anch'essa da 50 layers

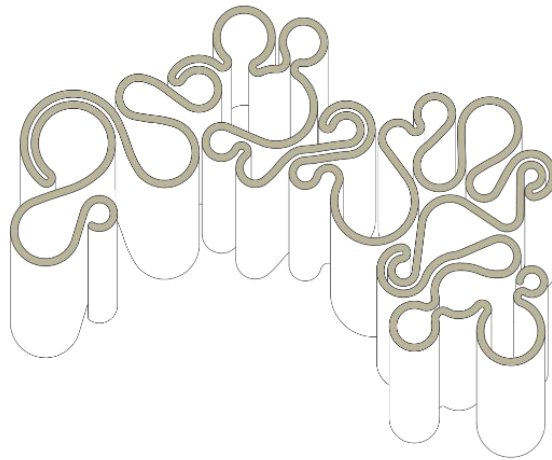
consecutivi, estendendo la costruzione per ulteriori 500 mm in altezza, fino a raggiungere la quota di 1000 mm dalla base. Questa fase intermedia ha beneficiato della stabilizzazione strutturale fornita dal rinforzo in fibra di vetro, consentendo la realizzazione delle geometrie complesse nelle zone precedentemente identificate come critiche.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.08-** Planimetria con punti di *bridge*- *Livello 1* - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



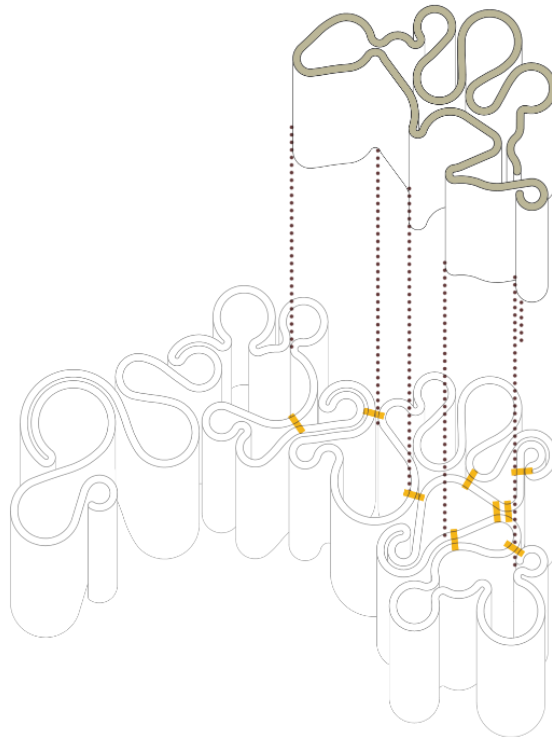
**TAV.09-** Vista assometrica- *Livello 1* - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV. 10-** Planimetria livello 2 (+100cm) - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



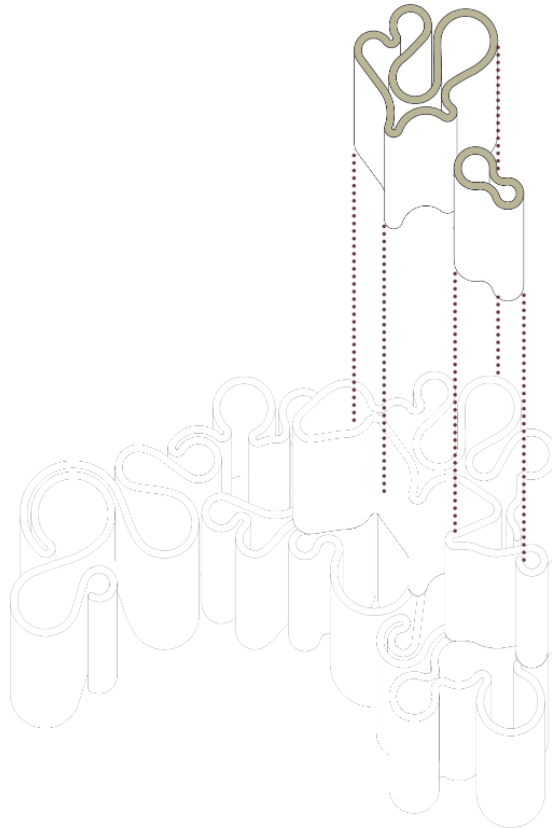
**TAV.11** - Vista assonometrica- *Livello 2* - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.12** - Planimetria livello 3 (+150cm)- ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



**TAV.13-** Vista assonometrica- *Livello 3* - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

La terza e ultima fase di deposizione ha completato il prototipo attraverso l'estrusione di ulteriori 50 layers, corrispondenti ai restanti 500 mm, portando l'altezza totale del dimostratore a 1500 mm (150 layers complessivi). Durante questa fase conclusiva, il carico strutturale gravante sugli strati inferiori ha raggiunto il valore massimo, validando l'efficacia della strategia di rinforzo adottata e confermando che le proprietà di buildability del materiale i.tech 3D N erano state correttamente bilanciate rispetto alla geometria e alla massa complessiva del componente.

La suddivisione del processo in tre fasi distinte, ciascuna costituita da 50 layers con altezza nominale di 10 mm, ha inoltre permesso un controllo più accurato della qualità del processo, consentendo ispezioni visive e verifiche dimensionali agli step intermedi e facilitando eventuali interventi correttivi prima del completamento definitivo del prototipo. Questa strategia di stampa incrementale si è rivelata essenziale per la corretta realizzazione di un componente di dimensioni rilevanti (altezza totale 1500 mm, 150 layers) caratterizzato da geometrie complesse e requisiti strutturali significativi.



*Alla pagina seguente:  
Fig.18*

*Stampa Vasemode  
Bench*

*©Vasemode Bench. |  
Progetto MICS 6.10*



**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*





**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*





Per finalizzare il prototipo "Vasemode Bench" e renderlo funzionale all'uso previsto, è necessario procedere con una fase conclusiva di completamento che prevede due interventi principali.

Il primo intervento consiste nel riempimento delle cavità interne dei gusci stampati in 3D mediante materiale di risulta o scarti provenienti dal processo costruttivo. Questa operazione assolve molteplici funzioni: incrementa la massa complessiva del componente migliorandone la stabilità, ottimizza il comportamento strutturale riducendo il rischio di deformazioni localizzate, e rappresenta una soluzione sostenibile attraverso il recupero e la valorizzazione di materiali di scarto che altrimenti costituirebbero rifiuti di processo.

Il secondo intervento riguarda il posizionamento di tappi o coperchi in corrispondenza delle superfici di seduta. Questi elementi di chiusura garantiscono la funzionalità del prototipo come elemento di arredo urbano, fornendo superfici di appoggio adeguate e proteggendo le cavità interne da infiltrazioni di acqua o accumulo di detriti che potrebbero comprometterne la durabilità nel tempo.

Questi interventi di completamento, sebbene eseguiti con tecniche tradizionali, si integrano efficacemente con il componente realizzato mediante manifattura additiva, confermando la possibilità di combinare processi innovativi e approcci costruttivi convenzionali per ottenere componenti architettonici funzionali e tecnicamente performanti.



*Alla pagina seguente:  
Fig.19*

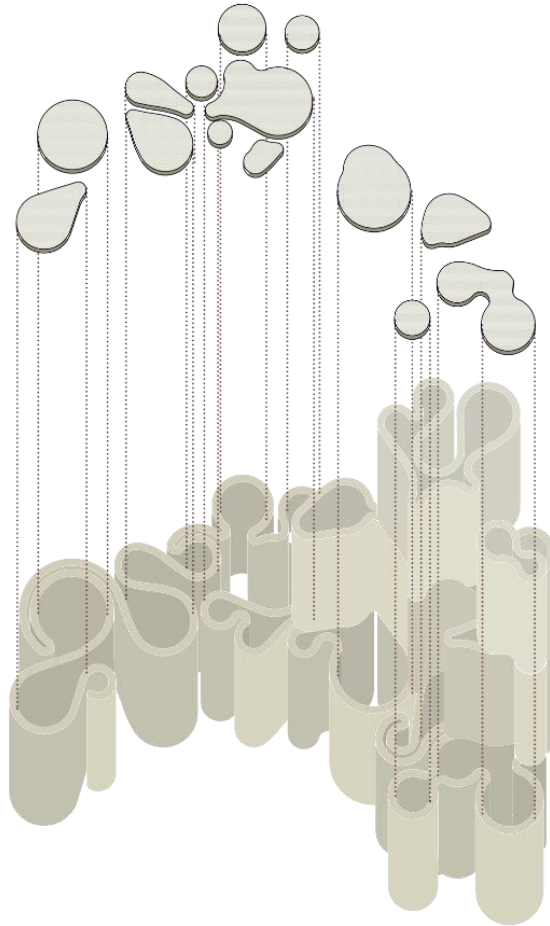
*Stampa completa  
Vasemode Bench*

*©Vasemode Bench |  
| Progetto MICS 6.10*

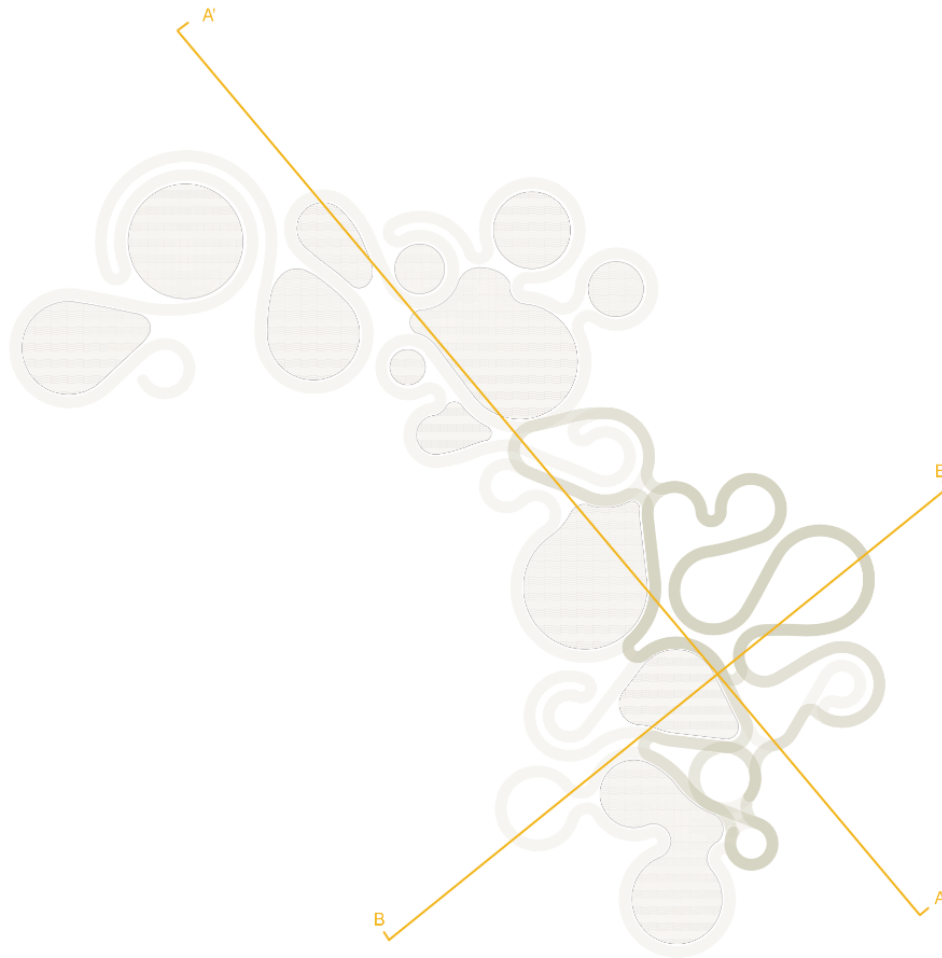


**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



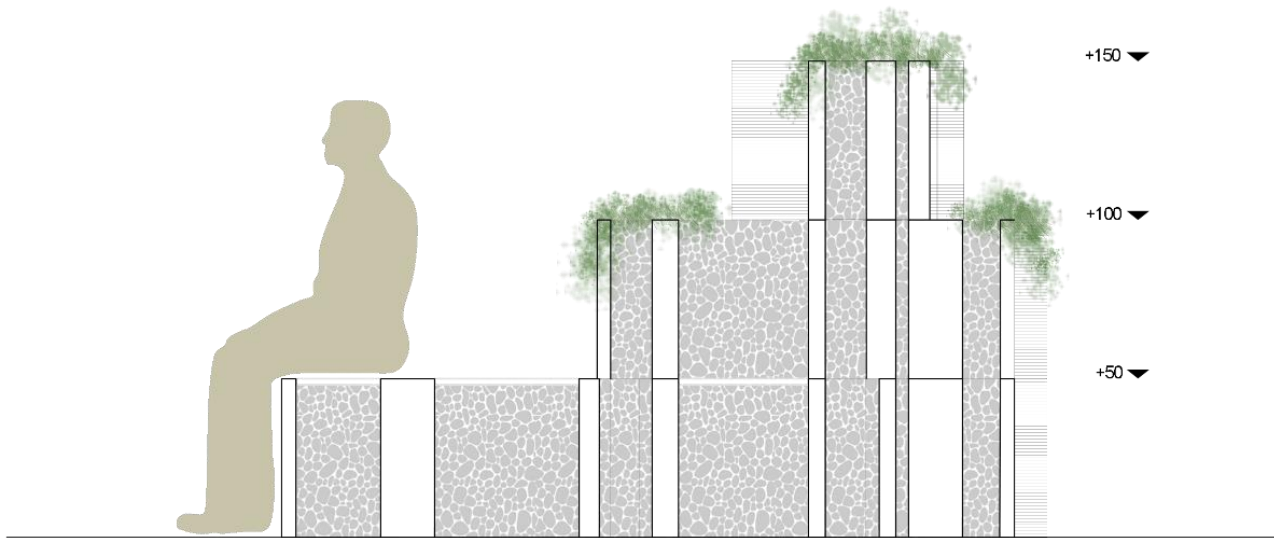
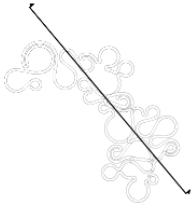
**TAV.14-** Vista assonometrica con tappi di copertura- © Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



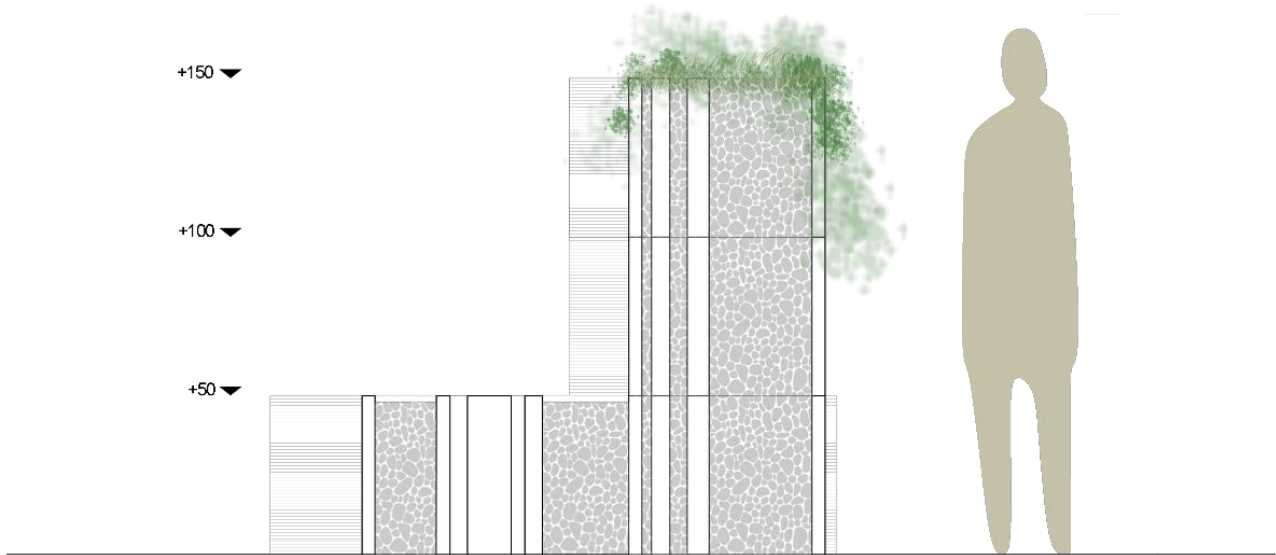
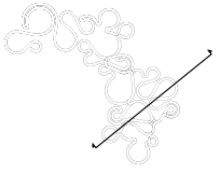
**TAV.15-** Planimetria sezioni - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.16-** Sezione AA' - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10



**TAV.17-** Sezione BB' - © Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10

La sperimentazione condotta sul prototipo "Vasemode Bench" apre prospettive applicative significative per la tecnologia di manifattura additiva nel campo dell'arredo urbano e dell'architettura del paesaggio, suggerendo scenari di implementazione che trascendono la dimensione puramente tecnica per configurarsi come strategie di intervento sul territorio.

L'elemento, caratterizzato dalla texture stratificata che costituisce la cifra distintiva del processo di stampa 3D, si presta a molteplici configurazioni spaziali e funzionali. La disposizione di componenti di questo tipo all'interno dello spazio pubblico può generare sistemi articolati di sosta e relazione, sfruttando le proprietà meccaniche del materiale cementizio e la sua naturale capacità di resistere alle sollecitazioni ambientali: esposizione agli agenti atmosferici, variazioni termiche, irraggiamento solare, oltre che all'usura derivante dall'utilizzo continuativo in contesti ad alta frequentazione.

La tecnologia di stampa 3D consente inoltre la generazione di intere famiglie di componenti modulari che, pur differenziandosi per funzione, mantengono una coerenza estetica e tecnologica. Accanto agli elementi seduta possono essere sviluppati contenitori vegetali che condividono lo stesso linguaggio formale e la medesima logica costruttiva, consentendo la creazione di infrastrutture verdi lineari in cui si alternano zone di sosta e ambiti vegetati. Questa integrazione tra componenti antropici e naturali risulta particolarmente efficace in contesti urbani dove si ricerca una riqualificazione ambientale attraverso l'inserimento di elementi vegetali performativi, capaci di mitigare l'isola di calore urbana e migliorare la qualità dell'aria.

La modularità intrinseca al processo digitale apre scenari di estrema flessibilità compositiva. La possibilità di generare elementi con geometrie variabili attraverso la modifica parametrica del file digitale consente la creazione di configurazioni spaziali adattabili a contesti urbani diversificati: dalle piazze pedonali ai parchi pubblici, dai belvedere panoramici alle aree di pertinenza di edifici pubblici. Ogni intervento può essere calibrato sulle specificità del sito, mantenendo tuttavia continuità nel processo produttivo e coerenza nel linguaggio architettonico.

Particolarmente promettente risulta l'applicazione in contesti paesaggistici ad alta esposizione ambientale. Il lungomare, i percorsi panoramici in quota, le aree di belvedere richiedono elementi di arredo capaci di resistere a sollecitazioni meccaniche e atmosferiche significative. La resistenza intrinseca del materiale cementizio, unita alla possibilità di controllo geometrico offerta dalla stampa 3D, consente la realizzazione di componenti strutturalmente performanti che si integrano organicamente con il paesaggio naturale, evitando l'impatto visivo spesso associato agli arredi urbani prefabbricati convenzionali.

La dimensione della personalizzazione formale costituisce un ulteriore ambito di sviluppo progettuale. La flessibilità del processo digitale consente la generazione di varianti formali site-specific, calibrate sulle caratteristiche morfologiche, culturali e funzionali del contesto di inserimento, mantenendo invariati i parametri di processo validati durante la sperimentazione prototipale.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.18-** Render di progetto- © Vasemode Bench |Progetto MICS 6.10

Questa capacità di personalizzazione apre prospettive inedite per progetti di riqualificazione urbana in cui l'identità locale può essere tradotta in soluzioni formali distintive, generando un senso di appartenenza e riconoscibilità negli spazi pubblici.

Dal punto di vista sistemico, la possibilità di produrre on-site o in prossimità del luogo di installazione riduce significativamente l'impatto logistico e ambientale associato al trasporto di componenti prefabbricati di grandi dimensioni. Questa caratteristica assume particolare rilevanza in contesti insulari, montani o comunque difficilmente accessibili, dove la manifattura additiva può configurarsi come strategia produttiva preferenziale rispetto ai sistemi costruttivi convenzionali.

La sperimentazione condotta con il prototipo "Vasemode Bench" dimostra quindi come la stampa 3D di componenti cementizi di dimensioni significative non rappresenti semplicemente un'innovazione tecnica, ma costituisca un vero e proprio cambio di paradigma nella concezione, produzione e implementazione di sistemi di arredo urbano. La convergenza tra controllo digitale della forma, sostenibilità produttiva, personalizzazione progettuale e integrazione ambientale delinea un orizzonte applicativo in cui la manifattura additiva può contribuire significativamente alla qualificazione degli spazi pubblici contemporanei, rispondendo simultaneamente a esigenze funzionali, estetiche e ambientali con soluzioni innovative e formalmente distintive.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.19-** Render di progetto - ©Vasemode Bench | Progetto MICS 6.10







**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

## 2.2 Stampa Indiretta

Se la stampa diretta configura l'architettura come processo di materializzazione continua attraverso la deposizione stratificata di materia viscosa, l'approccio indiretto introduce una logica costruttiva sostanzialmente differente. In questa modalità operativa, la manifattura additiva non produce l'oggetto architettonico finale, ma realizza le matrici destinate a contenere e conformare il materiale definitivo. La tecnologia non costruisce direttamente l'architettura, ma fabbrica il dispositivo che la genera: uno stampo il cui negativo geometrico determina la forma finale dell'elemento costruito.

La cassaforma — strumento consolidato della costruzione in calcestruzzo, storicamente vincolato alla geometria euclidea e alla standardizzazione industriale — viene liberata dai suoi limiti morfologici ed economici. Da dispositivo rigido e riutilizzabile, caratterizzato da geometrie elementari, si trasforma in negativo personalizzato capace di accogliere forme di qualsiasi complessità senza incrementi di costo proporzionali alla sofisticazione geometrica.

L'approccio indiretto si fonda sulla realizzazione di matrici tramite stampa 3D che fungono da casseforme per materiali quali calcestruzzo, terre crude stabilizzate, gessi o resine. Questa strategia consente di impiegare materiali non adatti all'estrusione diretta — miscele con viscosità inadeguata o tempi di presa incompatibili con la deposizione stratificata — e di ottenere superfici e dettagli difficilmente riproducibili con metodi additivi convenzionali.

Mentre la stampa diretta deve confrontarsi con i vincoli reologici del materiale fresco e con i limiti gravitazionali degli oggetti, l'approccio indiretto trasferisce queste criticità alla fase di progettazione dello stampo. Ciò consente la realizzazione di geometrie sottosquadrate, texture superficiali complesse, cavità interne e finiture controllate che risulterebbero altrimenti irrealizzabili.

La produzione di casseforme sagomate tramite manifattura additiva permette di ottenere elementi con geometrie complesse e personalizzate senza richiedere lavorazioni artigianali o stampi metallici su misura. Ogni matrice può essere adattata alle esigenze specifiche del singolo componente o di piccole serie produttive, rendendo economicamente sostenibile la produzione di elementi unici o semi-unicici secondo la logica di serialità della diversità che caratterizza le tecnologie additive applicate all'architettura.

L'efficacia del metodo dipende da una serie di condizioni tecniche e logistiche che ne condizionano l'applicazione pratica. La matrice deve essere progettata per consentire la rimozione senza danneggiare il pezzo finale, attraverso l'adozione di soluzioni di sformatura quali: suddivisione dello stampo in parti assemblabili, impiego di materiali sacrificali solubili, o progettazione di angoli di sformo compatibili con l'estrazione.

È inoltre necessario garantire la precisione geometrica nella riproduzione della forma, controllando le deformazioni dello stampo durante il getto, le variazioni dimensionali dovute al ritiro

del materiale e le tolleranze di assemblaggio tra le componenti della matrice.

Nonostante questi vincoli, la strategia indiretta offre notevole flessibilità progettuale, consentendo di superare i limiti tecnologici dei materiali da costruzione tradizionali e di ampliare le possibilità creative dell'architettura. Essa non sostituisce l'approccio diretto, ma si configura come strategia complementare capace di rispondere a esigenze morfologiche, materiche e prestazionali differenti.

In questa prospettiva, la manifattura additiva indiretta non replica le logiche produttive della prefabbricazione industriale, ma le reinterpreta attraverso la personalizzazione digitale. Si apre così la strada a una nuova concezione dell'architettura prefabbricata: non più standardizzata e seriale, ma discreta, diversificata e adattiva alle specificità contestuali e progettuali.

### 2.2.1 Manifattura additiva per forme discrete

La stampa indiretta, liberando la cassaforma dai vincoli della standardizzazione industriale, inaugura una trasformazione profonda nel modo stesso di concepire l'architettura costruita. La produzione di matrici personalizzate consente di generare componenti di qualsiasi geometria senza incrementi proporzionali di costo, rendendo possibile frammentare intenzionalmente l'architettura in unità discrete autonome, ciascuna delle quali può essere prodotta, trasportata e assemblata indipendentemente dalle altre.

Questo passaggio dalla forma continua alla configurazione discreta non costituisce una mera conseguenza logistica, ma rappresenta l'adozione consapevole di un paradigma compositivo alternativo, nel quale l'edificio non è più concepito come entità monolitica e indivisibile, ma come sistema di parti interconnesse, capaci di aggregarsi secondo logiche modulari, combinatorie e potenzialmente riconfigurabili.

In questa prospettiva, la manifattura additiva applicata a sistemi discreti si inserisce pienamente nel quadro concettuale dell'architettura discreta, un campo di ricerca che negli ultimi due decenni ha proposto una radicale trasformazione della concezione stessa dell'opera costruita e del processo che la genera.

A differenza della tradizione moderna, che ha storicamente inteso l'edificio come entità monolitica e conclusa, l'approccio discreto propone una visione sistemica, modulare e profondamente dinamica, fondata sulla scomposizione dell'architettura in unità

elementari autonome, capaci di aggregarsi secondo regole di combinazione flessibili, riconfigurabili e non gerarchiche.

Il termine "*discreto*", in questo contesto richiama esplicitamente il concetto matematico e informatico di discreto contrapposto a quello di continuo: un insieme composto da parti distinte, finite e numerabili, ciascuna dotata di una propria identità e autonomia funzionale.

In questa prospettiva epistemologica, l'architettura cessa di essere definita da un disegno statico e definitivo, per configurarsi invece come sistema aperto di relazioni dinamiche, capace di accogliere la variabilità, la trasformazione temporale, l'adattamento contestuale e persino la partecipazione attiva di attori esterni al tradizionale processo progettuale, siano essi utenti finali, comunità locali o agenti computazionali.

Questa rivoluzione concettuale si nutre di una molteplicità di contributi teorici eterogenei, provenienti da ambiti disciplinari diversi e apparentemente distanti, che hanno progressivamente convergono nella definizione di un nuovo quadro epistemologico per il progetto architettonico. Dall'informatica alla filosofia, dalla teoria dei media alla scienza dei materiali, dalla biologia alla teoria dei sistemi complessi, numerose discipline hanno offerto strumenti concettuali e metodologici capaci di ripensare radicalmente i fondamenti dell'architettura. Tra i riferimenti più rilevanti e consolidati emergono almeno tre pilastri fondamentali: i lavori di Neil Gershenfeld, Daniel Koehler e Mario Carpo offrono altrettante cornici interpretative complementari per comprendere la portata di questa trasformazione paradigmatica.

Il primo di questi contributi fondamentali proviene dal lavoro di *Neil Gershenfeld*, fisico e informatico del Massachusetts Institute of Technology, dove dirige il Center for Bits and Atoms, un laboratorio interdisciplinare dedicato all'esplorazione delle interfacce tra computazione digitale e realtà fisica. Gershenfeld ha elaborato e sviluppato il concetto di "*digital materials*"; materiali digitali, definendo con questa espressione sistemi costruttivi fondati su unità elementari discrete, progettate specificamente per essere riconfigurabili e interconnettibili in un numero finito ma preciso di modalità. Ciò che caratterizza i materiali digitali non è tanto la loro composizione chimica o le loro proprietà fisiche intrinseche, quanto piuttosto la logica delle connessioni che li governa: tali materiali non si identificano infatti con una specifica sostanza o un particolare composto, ma rappresentano un livello ulteriore di astrazione, in cui ciò che conta è la capacità degli elementi costitutivi di aggregarsi in forme sempre diverse secondo regole combinatorie definite, mantenendo al contempo la completa reversibilità dei processi di assemblaggio.

Gli elementi di un materiale digitale possono essere realizzati in legno, metallo, plastica o qualsiasi altro materiale fisico, ma ciò che li definisce come "digitali" è precisamente questa proprietà di essere componibili e ricomponibili secondo logiche discrete, analoghe a quelle che governano l'informazione digitale. In tal senso, il materiale digitale si configura come un vero e proprio ponte concettuale e operativo tra l'universo astratto della computazione e quello concreto della fabbricazione architettonica, tra il bit e l'atomo, tra l'informazione e la materia.

Il secondo pilastro teorico è rappresentato dal pensiero di Daniel Koehler, che nel volume "Mereological Thinking" introduce la mereologia<sup>4</sup> — disciplina filosofica che indaga i rapporti tra parte e intero — come fondamento epistemologico dell'architettura discreta. Secondo questa prospettiva, l'edificio non è più un'entità monolitica e indivisibile, ma un insieme articolato di parti interconnesse, ciascuna dotata di autonomia funzionale e al contempo definita dalle relazioni con le altre componenti del sistema. Questo cambio di paradigma consente di concepire architetture come sistemi generativi regolati da principi di aggregazione che determinano le modalità di combinazione delle parti senza prescrivere una configurazione definitiva. L'architettura mereologica è quindi un'architettura potenziale, che esiste in molteplici stati possibili atualizzabili in base a specifiche condizioni contestuali, funzionali o temporali: la configurazione non è un esito statico, ma una condizione mutabile, capace di evolversi e adattarsi in risposta a nuove esigenze. Secondo questa prospettiva, l'edificio non è più un'entità monolitica e indivisibile, ma un insieme articolato di parti interconnesse, ciascuna dotata di autonomia funzionale e al contempo definita dalle relazioni con le altre componenti del sistema. Questo cambio di paradigma consente di concepire architetture come sistemi generativi regolati da principi di

---

<sup>4</sup> La *mereologia*, dal greco *méros* (parte) e *loghía* (studio), costituisce il fondamento teorico dell'architettura discreta, poiché indaga le relazioni parte-tutto e il modo in cui gli elementi componenti, in base alle loro proprietà e capacità, concorrono alla definizione di sistemi e configurazioni spaziali più ampie.

aggregazione che determinano le modalità di combinazione delle parti senza prescrivere una configurazione unica e definitiva.

Il terzo e ultimo contributo teorico fondamentale proviene dagli scritti di Mario Carpo, storico dell'architettura e teorico del digitale, che analizza la transizione dall'architettura moderna — fondata su principi meccanici e standardizzati della rivoluzione industriale — a un'architettura digitale e computazionale, caratterizzata da logiche profondamente diverse., caratterizzata da logiche profondamente diverse. Carpo evidenzia come il digitale non si limiti semplicemente a introdurre nuovi strumenti di rappresentazione grafica o nuove tecnologie di fabbricazione, ma modifichi in modo radicale e irreversibile i fondamenti stessi del progettare, le sue categorie concettuali, le sue metodologie operative. Secondo Carpo, l'architettura dell'età digitale non può più essere pensata secondo il modello della produzione di massa standardizzata, che aveva caratterizzato il Movimento Moderno e gran parte del Novecento architettonico, ma deve invece confrontarsi con nuove possibilità tecniche e concettuali: *la mass customization*, la variazione seriale, la generazione algoritmica della forma, la fabbricazione personalizzata su larga scala. L'architettura discreta si inserisce pienamente e coerentemente in questa transizione storica e culturale: il progetto non è più inteso come disegno di forme finite e concluse, destinate a essere replicate identicamente, ma diventa definizione di algoritmi, regole, sistemi e relazioni, che costituiscono il framework generativo entro cui possono emergere molteplici configurazioni specifiche, ciascuna adattata a particolari condizioni e requisiti.

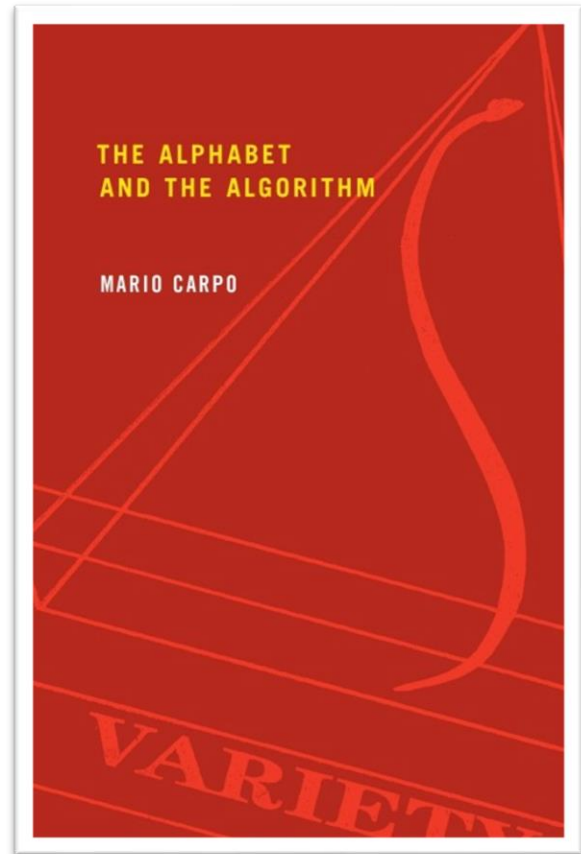
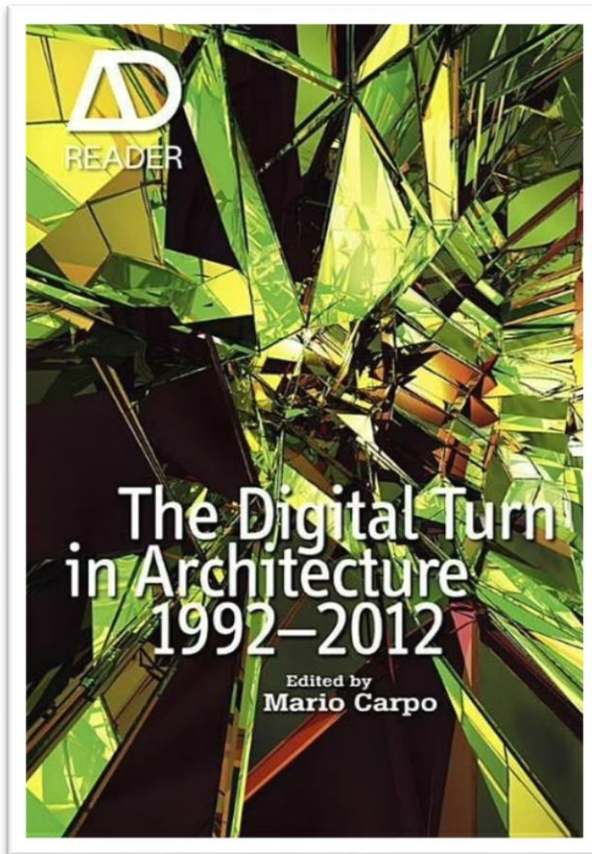


*Alla pagina seguente:  
Fig.20*

*Copertina del libro:*

*a. CARPO, M., The Alphabet and the Algorithm, MIT Press, Cambridge, 2011.*

*b. CARPO, M. (a cura di), The Digital Turn in Architecture 1992–2012, John Wiley & Sons, Chichester, 2012.*



*«Digital design and fabrication technologies are changing the way we make things, and the way we think about making things. They are also changing the way we think about architecture. »*

*M. Carpo*

Se la teoria ha aperto il campo a nuove interpretazioni concettuali e ha fornito le basi epistemologiche per ripensare l'architettura, la sperimentazione accademica ha avuto il merito fondamentale di tradurre queste logiche astratte in pratiche concrete, in progetti reali, in artefatti fisici che hanno permesso di verificare empiricamente le potenzialità e le criticità del paradigma discreto.

Tra i centri di ricerca più attivi e influenti a livello internazionale in questo campo spicca indubbiamente la Bartlett School of Architecture dell'University College London, una delle istituzioni più prestigiose e innovative nel panorama della formazione e della ricerca architettonica contemporanea. In particolare, il B-Pro Research Cluster 4, unità di ricerca avanzata diretta per diversi anni da Gilles Retsin, ha sviluppato un programma sistematico di sperimentazione sull'architettura discreta, producendo negli ultimi anni una serie di progetti emblematici che hanno contribuito in modo significativo a definire il campo disciplinare e a dimostrarne le concrete possibilità applicative.

La ricerca del gruppo ha esplorato diverse scale e tipologie progettuali, dall'elemento d'arredo al componente architettonico, sperimentando metodologie differenziate di aggregazione discreta. Questa varietà tipologica dimostra come il paradigma discreto possa essere declinato attraverso materiali, tecnologie e logiche combinatorie diverse, testando sistematicamente i limiti e le potenzialità di ciascun approccio.

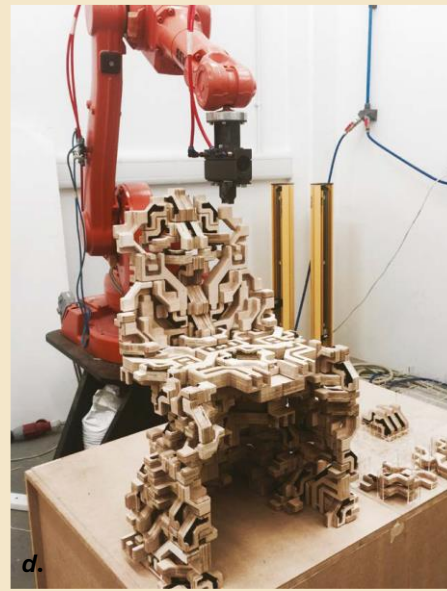
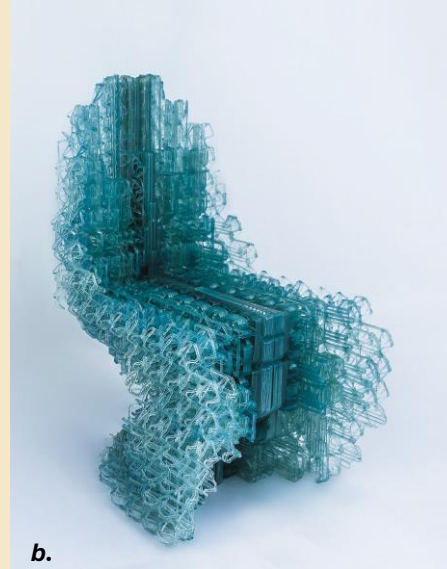
▶▶  
Alla pagina  
precedente:  
*Fig.21 Progetti del  
RC4, The Bartlett  
School of  
Architecture, UCL,  
Londra*

a. MickeyMatter,  
Gilles Retsin, Manuel  
Jiménez García,  
Vicente Soler, 2016  
©[https://blog-  
espritdesign.com/mobil  
ier/banc/mickeymatter-  
groupe-de-recherche-  
rc4-47159](https://blog-espritdesign.com/mobilier/banc/mickeymatter-groupe-de-recherche-rc4-47159)

b. VoxelChair v1.0,  
Manuel Jiménez  
García, Gilles Retsin  
2017  
©[https://www.dezeen.c  
om/2017/05/17/robot-  
made-voxel-chair-new-  
software-bartlett-  
researchers-design-  
furniture-technology-  
chairs-robots/](https://www.dezeen.com/2017/05/17/robot-made-voxel-chair-new-software-bartlett-researchers-design-furniture-technology-chairs-robots/)

c. CurVoxels,  
Hyunchul Kwon,  
Amreen Kaleel,  
Xiaolin Li, 2015  
©[https://www.dezeen.c  
om/2016/02/05/bartlett  
-students-ucl-3d-  
printed-filigree-chairs-  
robots/](https://www.dezeen.com/2016/02/05/bartlett-students-ucl-3d-printed-filigree-chairs-robots/)

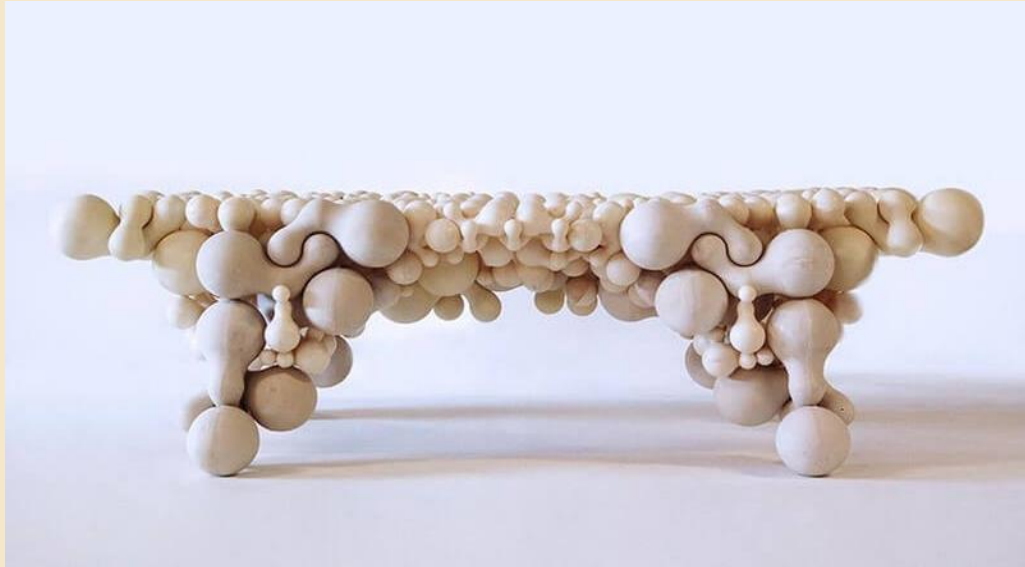
d. INT Chair, Zoey Tan,  
Claudia Tanskanen,  
Qianyi Li, Xiaolin Yin,  
2016  
©[https://parametric-  
architecture.com/int-  
chair-robotic-building-  
blocks/](https://parametric-architecture.com/int-chair-robotic-building-blocks/)



Il progetto *MickeyMatter*, sviluppato dal gruppo RC4 del Design Computation Lab della Bartlett School of Architecture, rappresenta un esempio significativo di applicazione dei principi dell'architettura discreta alla scala del design industriale. Il progetto esplora l'assemblaggio robotico di elementi plastici sferici standardizzati per la produzione di mobili e componenti architettonici, proponendo un ritorno strategico alla standardizzazione: la complessità emerge dalla combinazione intelligente di componenti identici piuttosto che dalla differenziazione di ogni singolo elemento. Il processo di fabbricazione adottato è lo stampaggio a compressione di pellet in ABS utilizzando stampi in alluminio fresati a CNC in tre diverse scale, permettendo così di produrre componenti economici ma caratterizzati da un'elevata precisione dimensionale. L'impiego di bracci robotici industriali per l'assemblaggio rappresenta l'elemento cruciale del sistema: la robotica non è mero strumento di automazione, ma diventa parte integrante della logica progettuale, garantendo la precisione millimetrica necessaria per assemblare componenti sferici standardizzati secondo configurazioni complesse. L'integrazione tra design computazionale e fabbricazione robotica crea un workflow continuo dove gli algoritmi generano configurazioni ottimali traducendole direttamente in istruzioni per i robot assemblatori. I prototipi in piccola scala, come sedie e tavoli, fungono da laboratorio per sviluppare regole precise applicabili successivamente ad assemblaggi su scala architettonica più ampia, un approccio metodologico che procede per incrementi di complessità, testando prima le logiche combinatorie su oggetti familiari prima di affrontare la scala architettonica.

► Fig.22  
MickeyMatter, Gilles  
Retsin e Manuel  
Jiménez García —  
RC4, Design  
Computation Lab,  
The Bartlett School of  
Architecture, UCL,  
Londra, 2017

© <https://blog-espritdesign.com/mobilier/banc/mickeymatter-groupe-de-recherche-rc4-47159>



**MATERIALE:** ABS

**TECNICA**  
Stampaggio a  
compressione



Il progetto WireVoxels, anch'esso sviluppato presso la Bartlett School of Architecture indaga l'uso della fabbricazione robotica nel design discreto attraverso la piegatura robotizzata del filo d'acciaio per creare sistemi costruttivi modulari basati sull'adozione del voxel come unità costruttiva fondamentale. Mutuato dalla computer graphics, il voxel diventa un componente fisico discreto ottenuto attraverso la piegatura del filo, dotato di proprietà geometriche e strutturali che ne determinano le modalità di aggregazione spaziale.

La tecnica si fonda sull'impiego di bracci robotici programmati per eseguire operazioni di piegatura controllata, trasformando elementi lineari in configurazioni spaziali tridimensionali con precisione millimetrica e ripetibilità assoluta. La scelta del filo d'acciaio risponde a considerazioni strutturali e processuali: resistenza meccanica e malleabilità sufficiente per deformazioni plastiche controllate. L'integrazione tra programmazione algoritmica ed esecuzione robotica configura un workflow in cui il design computazionale si traduce direttamente in istruzioni macchina, mentre la modulazione della densità strutturale attraverso la variazione della concentrazione dei voxel consente di rispondere a differenti requisiti prestazionali in termini di resistenza meccanica e ottimizzazione del rapporto peso-resistenza.

Se WireVoxels esplora la discretizzazione attraverso la deformazione plastica di materiali metallici e l'assemblaggio robotico, TimBLOCK propone un approccio complementare che riporta il focus sulla materialità naturale e sulle tecniche di lavorazione sottrattiva. Questo progetto rappresenta

un'integrazione tra tecniche tradizionali e fabbricazione digitale attraverso l'utilizzo di componenti lignei fresati a CNC, dimostrando come il paradigma discreto possa essere declinato attraverso strategie tecnologiche e materiche profondamente diverse.

La fresatura a controllo numerico consente di ottenere precisione elevatissima nelle geometrie di incastro, garantendo tolleranze ridotte e connessioni meccaniche affidabili senza elementi aggiuntivi come colle o giunzioni metalliche. Analogamente a WireVoxels, ogni modulo è concepito come unità strutturale autonoma, dotata di una logica geometrica che ne permette l'aggregazione secondo configurazioni spaziali adattabili alle esigenze funzionali e morfologiche del progetto.

La scelta del legno risponde a criteri strutturali oltre che ecologici: leggerezza e resistenza meccanica favoriscono l'assemblaggio a secco, la smontabilità e il riuso, principi che richiamano la flessibilità compositiva e la manutenibilità per sostituzione di elementi singoli già evidenziata in WireVoxels. La lavorazione CNC assicura la ripetibilità del processo produttivo, rendendo il sistema scalabile e adatto a un'industrializzazione sostenibile, così come la robotica garantisce la standardizzazione della produzione nel sistema metallico.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

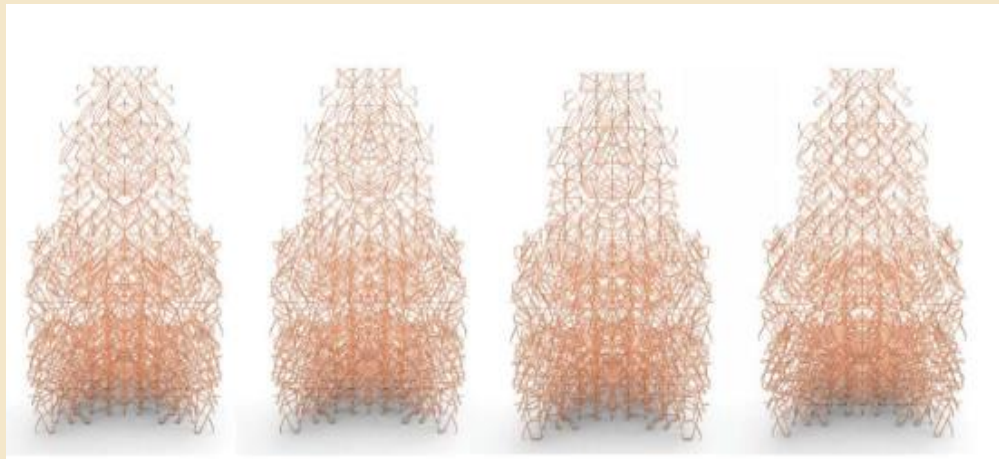
► Fig.23

*WireVoxels (Robotic Bent Steel), Gilles Retsin, Manuel Jiménez García e Vicente Soler — RC4, Design Computation Lab, The Bartlett School of Architecture, UCL, Londra, 2015.*

©<https://issuu.com/donghwikim/docs/portofoliowirevoxel>

**MATERIALE:** Acciaio piegato

**TECNICA**  
Piegatura robotica dell'acciaio



► Fig.24

TimBlock, Gilles  
Retsin, Manuel  
Jiménez García e  
Vicente Soler — RC4,  
Design Computation  
Lab, The Bartlett  
School of  
Architecture, UCL,  
Londra, 2016.

©[https://www.behance.net/gallery/49861375/RC4-Int?locale=it\\_IT](https://www.behance.net/gallery/49861375/RC4-Int?locale=it_IT)

**MATERIALE:** Legno  
(elementi lignei  
standardizzati)

**TECNICA**  
Fresatura CNC e  
assemblaggio  
modulare a secco



I tre progetti analizzati indagano un approccio discreto e parametrico alla costruzione, in cui l'organismo architettonico prende forma attraverso l'aggregazione di parti elementari ottimizzate digitalmente. Sfere in ABS stampate a compressione (MickeyMatter), voxel in filo d'acciaio deformato plasticamente (WireVoxels) e blocchi lignei fresati a CNC (TimBLOCK), pur nella loro eterogeneità materica e produttiva, convergono verso sistemi costruttivi flessibili, reversibili e orientati alla sostenibilità, capaci di bilanciare razionalizzazione industriale e libertà compositiva.

Alla base di questi approcci si riconosce una logica condivisa: la precisione della fabbricazione digitale assicura ripetibilità e scalabilità, mentre l'assemblaggio — affidato alla robotica industriale o a sistemi di connessione meccanica — rappresenta il momento in cui la computazione si traduce in configurazione spaziale concreta. All'interno di questo quadro comune, ciascun sistema evidenzia specifiche qualità: l'efficienza economica di MickeyMatter, la leggerezza strutturale di WireVoxels, la sostenibilità materica e la reversibilità costruttiva di TimBLOCK. Il paradigma discreto emerge così non come una soluzione unitaria, ma come un framework concettuale aperto, in grado di adattarsi a differenti requisiti progettuali, vincoli tecnologici e scelte di materiale.

Il passaggio dalla sperimentazione su elementi di arredo alla realizzazione di strutture architettoniche complete costituisce tuttavia una soglia critica. L'aumento di scala implica non solo un'estensione dimensionale del sistema, ma anche la verifica delle prestazioni strutturali e della fattibilità costruttiva. In questo contesto, il lavoro di Gilles Retsin rappresenta un'evoluzione

significativa, spingendo l'architettura discreta oltre la dimensione del prototipo verso applicazioni architettoniche pienamente operative.

Formatosi alla Architectural Association di Londra e successivamente direttore del Master in Architecture B-Pro presso la Bartlett School of Architecture, Retsin ha portato l'architettura discreta al centro del dibattito internazionale attraverso una ricerca sistematica sulle potenzialità della fabbricazione robotica, dell'automazione costruttiva e della computazione applicata al progetto. La sua posizione teorica sostiene il paradigma discreto come un nuovo modello costruttivo, capace di mettere in discussione e progressivamente superare i sistemi ereditati dalla modernità.

La produzione progettuale di Retsin si distingue per il superamento della scala sperimentale, concretizzandosi in padiglioni e strutture architettoniche di dimensioni rilevanti che dimostrano la reale scalabilità del sistema. Queste opere costituiscono verifiche tangibili della transizione dalla teoria alla pratica edilizia, mostrando come la logica combinatoria possa tradursi in costruzione reale e confermando la validità del paradigma discreto come strategia applicabile all'architettura.

Un esempio emblematico è il padiglione presentato alla Biennale di Architettura di Tallinn nel 2017, realizzato con blocchi modulari in compensato standardizzati e prodotti mediante fresatura CNC. Il progetto dimostra come un unico modulo possa assumere ruoli strutturali differenti — elemento verticale, orizzontale o di copertura — semplicemente attraverso variazioni di

configurazione e di connessione. L'assemblaggio, volutamente aperto, consente modifiche anche in fase di costruzione senza necessità di riprogettazioni complesse, introducendo un grado di adattabilità in tempo reale che rappresenta uno dei tratti distintivi dell'architettura discreta.

Con il progetto *Real Virtuality*, Retsin ha ulteriormente esteso questa ricerca, sperimentando l'integrazione tra fabbricazione digitale e realtà aumentata per ridurre la distanza tra progetto e costruzione. Attraverso dispositivi indossabili, le istruzioni di montaggio vengono derivate direttamente dal modello digitale e visualizzate nello spazio fisico mediante overlay grafici, guidando gli operatori nell'identificazione dei componenti, nel loro posizionamento e nella sequenza di assemblaggio. Questo approccio contribuisce a ridurre errori, tempi di esecuzione e la dipendenza da elaborati tradizionali, aprendo la strada a un processo architettonico sempre più integrato e digitalizzato.

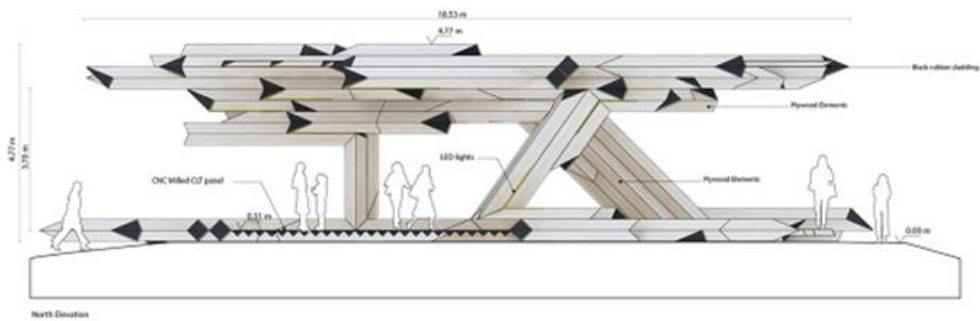
Nel complesso, il contributo di Retsin dimostra come l'architettura discreta, inizialmente validata alla scala del design e del prototipo, possa essere efficacemente trasferita a sistemi costruttivi architettonici, delineando prospettive concrete per una trasformazione profonda dei processi edilizi contemporanei.



*Alla pagina seguente:  
Fig.25*

*Padiglione della  
Biennale di  
Architettura di Tallinn,  
Gilles Retsin, Tallinn,  
2017*

©<https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion>



**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



◀◀  
Alla pagina  
precedente:  
Fig.26

*Real Virtuality*, Gilles  
Retsin — Royal  
Academy of Arts,  
Londra, 2019.

©<https://www.retsin.org/Royal-Academy-of-Arts>

Accanto al lavoro di Gilles Retsin, altri contributi hanno ampliato il campo dell'architettura discreta, introducendo in modo esplicito la dimensione della creatività collettiva e aprendo nuove prospettive operative. In questa direzione si colloca la ricerca dell'architetto e game designer José Sanchez, che ha esplorato le potenzialità partecipative dei sistemi discreti, spostando l'attenzione dal solo processo costruttivo alla relazione tra progetto, utenti e uso dello spazio.

Con Bloom, realizzato in occasione delle Olimpiadi di Londra del 2012, Jose Sanchez ha trasformato l'architettura in una piattaforma aperta e accessibile. Migliaia di moduli plastici sono stati messi a disposizione dei visitatori, che li hanno assemblati liberamente generando configurazioni spontanee e imprevedibili. In questo scenario il ruolo del progettista non è più quello di autore unico della forma finale, ma di ideatore di un sistema di regole e componenti entro cui gli utenti possono intervenire attivamente. L'architettura diventa così un processo condiviso, capace di adattarsi continuamente attraverso l'uso, ridefinendo i confini tradizionali tra progettazione e fruizione.

Questa riflessione è stata poi ulteriormente sviluppata da Sanchez con la fondazione del Plethora Project, una piattaforma di ricerca dedicata alla progettazione computazionale che integra strumenti tipici dei videogame nel processo architettonico. L'impiego di game engines consente di lavorare con simulazioni fisiche in tempo reale, ambienti interattivi e gestione dinamica di sistemi complessi, trasferendo le logiche del gioco al progetto dello spazio costruito.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*





Alla pagina  
precedente:  
Fig.27

Bloom, José Sanchez  
e Alisa Andrasek,  
Londra, 2012

©<https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion>

I contributi analizzati delineano la portata teorica e operativa dell'architettura discreta attraverso tre dimensioni complementari. Sotto il profilo ambientale, la scomponibilità e ricombinabilità degli elementi introducono modelli di economia circolare, riconfigurando l'edificio come assemblaggio reversibile anziché entità permanente. Questa condizione abilita strategie di riduzione degli sprechi, prolungamento del ciclo di vita dei materiali e adattamento continuo alle esigenze mutevoli.

Dal punto di vista tecnologico, l'integrazione tra fabbricazione digitale, automazione robotica e computazione avanzata configura scenari di produzione distribuita in cui la standardizzazione degli elementi base abilita, anziché limita, la differenziazione formale e funzionale. La tradizionale conflittualità tra serialità industriale e personalizzazione progettuale si dissolve in sistemi generativi capaci di produrre variabilità a partire da regole comuni.

Sul piano culturale, le logiche partecipative ridefiniscono il ruolo dell'architetto e i rapporti di potere nel processo progettuale. L'architettura diventa piattaforma aperta in cui utenti, comunità e sistemi computazionali concorrono alla definizione dello spazio costruito, promuovendo modelli più inclusivi e democratici.

L'architettura discreta emerge come direzione strategica per affrontare le sfide del XXI secolo, attraverso un ripensamento radicale del progetto e della costruzione fondato su logiche sistemiche, generative e collaborative, orientando lo sviluppo di un ambiente costruito più sostenibile e coerente con le trasformazioni contemporanee.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



## 2.2.2 Il contesto della ricerca

La presente ricerca si inserisce in una linea di sperimentazione avviata dal gruppo di ricerca Fablab Poliba sulla manifattura additiva indiretta applicata a sistemi costruttivi in terra cruda, con particolare attenzione alla produzione di casseforme per conci modulari destinati all'assemblaggio di strutture architettoniche in terra.

Il progetto si è sviluppato a partire da precedenti indagini sulla tassellazione spaziale condotte dal gruppo di ricerca, dalle quali è emerso che la forma ottaedrica troncata rappresenta una delle geometrie più performanti per l'aggregazione tridimensionale, rientrando nella categoria dei "*space filling polyhedron*".<sup>5</sup>

Questa configurazione geometrica è stata applicata nella progettazione del concio base, la cui prima realizzazione è avvenuta durante la Summer Academy "Self Made Architecture V" tenutasi a Casalincontrada dal 21 al 25 luglio 2022, presso il Laboratorio dell'architetto Gianfranco Conti, in collaborazione con il Centro di Documentazione sulla terra cruda (CED Terrae) in un'area dell'Abruzzo fortemente caratterizzata dalla presenza di architetture storiche in terra. Durante questa prima fase sperimentale sono stati prodotti circa novanta conci utilizzando quindici casseforme stampate in 3D in acido polilattico (PLA).

---

<sup>5</sup> In geometria, uno *space-filling polyhedron* è un poliedro che consente la partizione completa dello spazio tridimensionale tramite operazioni di traslazione, rotazione e riflessione, senza generare vuoti o sovrapposizioni.



Alla pagina  
precedente:  
Fig.28

Concio in terra  
abruzzese,  
Casalincontrada -  
2022

© Summer Academy  
"Self Made  
Architecture V" -  
Gruppo di ricerca  
FABLAB PoliBa —  
Coord.: Prof. N.  
Parisi | Componenti:  
F. Fieni, M. Lops, A.  
V. Graziano, F. Del  
Curatolo, F. Fiorio, V.  
Savino

La miscela impiegata, ottenuta dalla miscelazione di terreno argilloso proveniente dai calanchi abruzzesi, è stata compattata nelle casseforme mediante un pistone stampato in 3D.

L'assemblaggio del primo prototipo "Earth Beehive" è stato realizzato durante la seconda sessione della Summer Academy dal 14 al 18 settembre 2022, in concomitanza con la XXVI edizione della Festa della Terra, dove è stato costruito utilizzando conci pieni in terra cruda.

La sperimentazione condotta ha evidenziato alcune criticità strutturali, in particolare nelle zone caratterizzate da vuoti e aggetti, dove i conci non disponevano di supporto sulle facce di base e risultavano maggiormente soggetti a instabilità per effetto delle spinte laterali dovute alla geometria del concio stesso.

L'ottimizzazione successiva della geometria del concio è stata sviluppata nell'ambito del laboratorio di laurea "Selfmade7" presso il Politecnico di Bari, nel quale è stata introdotta una stella cilindrica cava al centro dell'elemento, soluzione che consente l'aggregazione in oggetto e amplia le possibilità configurative del sistema.

Una volta ottimizzata la geometria della cassaforma stampata in 3D, la ricerca si è concentrata sul perfezionamento del mix design del materiale: inizialmente attraverso test empirici su terreno locale, successivamente mediante collaborazione con uno dei partner del progetto MICS finanziato da PNRR.

▶▶  
Alla pagina  
successiva:  
Fig.29  
Fasi realizzazione  
concio,  
Casalincontrada -  
2022

© Summer Academy  
"Self Made  
Architecture V"

**Mariangela Lops**

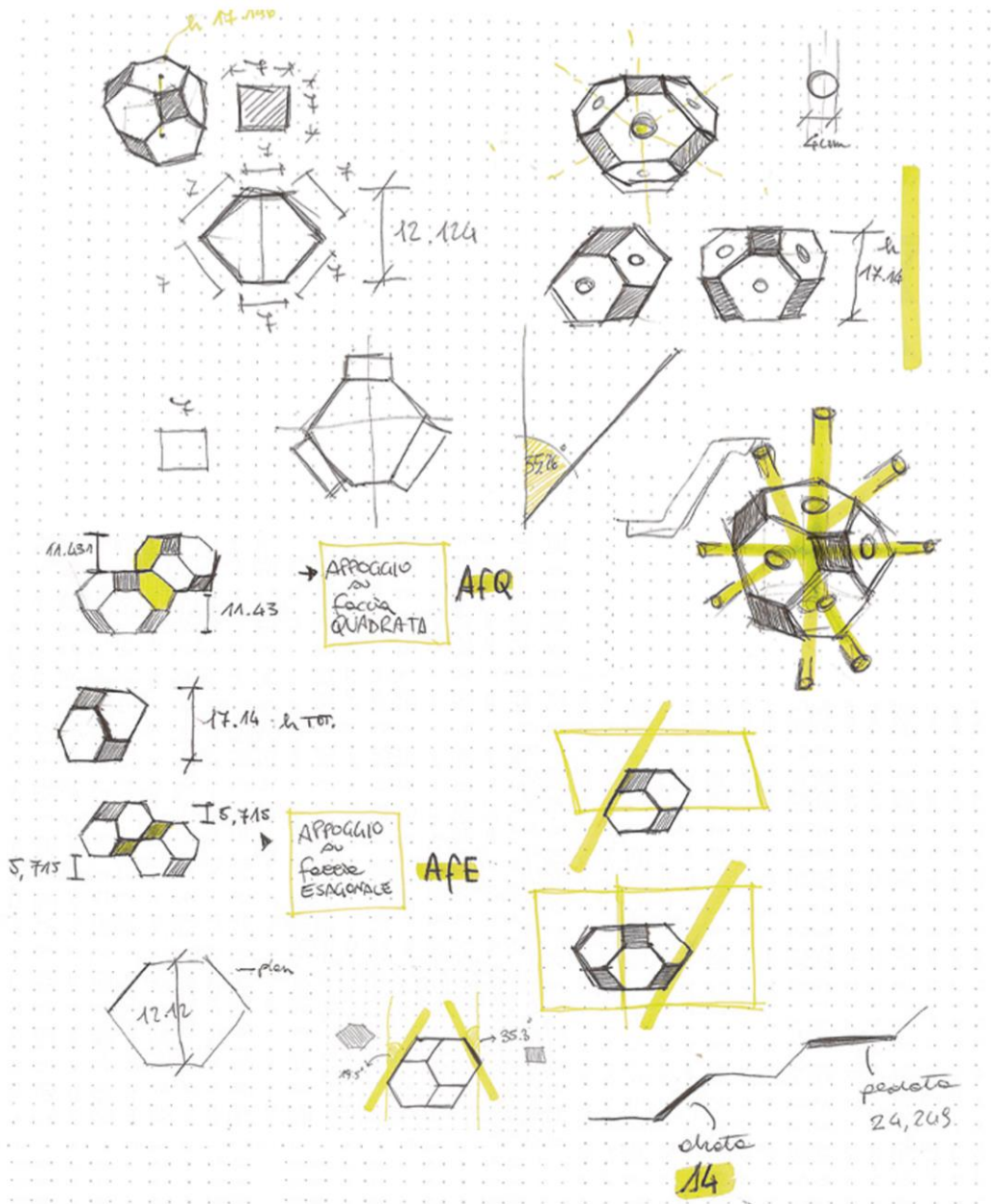
*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*





L'Università di Roma La Sapienza ha condotto uno studio su una terra locale pugliese, sviluppando malte geopolimeriche attraverso la valorizzazione di questo materiale naturale. La ricerca ha indagato la Terra Rossa come sostituto parziale della sabbia in malte geopolimeriche one-part, introducendo inoltre strategie di rinforzo mediante filler a base di bambù. I risultati hanno evidenziato come, nonostante le criticità legate alla natura argillosa del suolo, le malte contenenti Terra Rossa raggiungano requisiti compatibili con applicazioni non strutturali, confermando il potenziale del materiale come aggregato sostenibile e ponendo le basi per una futura applicazione in processi di manifattura additiva.

Questa linea di ricerca parallela fornisce un riferimento utile per confronti futuri e per l'eventuale ottimizzazione delle proprietà strutturali del sistema, pur non costituendo un prerequisito per la fattibilità del metodo con materiali naturali non stabilizzati. La rete collaborativa ha permesso di costruire una base metodologica condivisa e interdisciplinare, capace di integrare ricerca geometrica, ottimizzazione dei dispositivi di formatura e sviluppo di materiali locali a basso impatto ambientale, delineando il contesto tecnico-scientifico entro cui si colloca il dimostratore architettonico sviluppato nella presente ricerca come esito critico e sperimentale volto a esplorare le potenzialità della manifattura additiva indiretta nel ridefinire i rapporti tra forma, materia locale e costruzione sostenibile.



### 2.2.3 Il dimostratore architettonico



*Alla pagina  
precedente:*

*Fig.30*

*Fase esplorativa:  
schizzi e appunti di  
progetto*

*©Earth Beehive  
Bench. Progetto  
MICS 6.10,  
coordinamento  
scientifico: Prof. N.  
Parisi.*

*Collaborazioni:  
Sapienza Università  
di Roma, Politecnico  
di Torino, Università  
degli Studi di Napoli  
Federico II.*

Earth Beehive Bench è un dimostratore di manifattura additiva indiretta applicata alla scala dell'arredo urbano. Il progetto si configura come un sistema modulare basato sulla geometria dell'ottaedro troncato, progettato e realizzato mediante casseforme stampate in 3D per la produzione di conci in terra cruda assemblabili a secco.<sup>6</sup>

Il dimostratore nasce con l'obiettivo di esplorare le potenzialità della produzione additiva indiretta nel superamento dei modelli costruttivi convenzionali, introducendo logiche progettuali fondate sulla modularità parametrica, sull'impiego di materiali naturali e a chilometro zero e sull'ottimizzazione del rapporto tra geometria, processo di formatura e modalità di assemblaggio.

Dal punto di vista tecnologico, il prototipo sperimenta una strategia di produzione ibrida che combina manifattura additiva per la realizzazione delle casseforme e tecniche costruttive tradizionali per la formatura dei conci in terra cruda. Questo approccio consente di integrare il controllo geometrico e la ripetibilità garantiti dalla stampa 3D con le qualità ambientali dei materiali naturali, generando componenti caratterizzati da basso impatto ambientale, reversibilità costruttiva e integrazione con cicli produttivi circolari.

---

<sup>6</sup> Il dimostratore Earth Beehive Bench è il risultato di una ricerca progettuale elaborata nel progetto MICS e coordinata dal Prof. Nicola Parisi e da un gruppo di ricerca di cui la sottoscritta ha fatto parte in qualità di dottoranda e composto anche da Daniele Colapinto, Vincenzo Berardi, Angelo Vito Graziano, Vincenza Savino.

Il sistema costruttivo si basa su ottaedri troncati, solidi che consentono la formazione di strutture tridimensionali stabili attraverso il semplice contatto faccia-faccia. Ogni elemento consiste in un blocco di terra cruda compattato all'interno di stampi in PLA stampati in 3D, rappresentando un'innovativa ibridazione tra materiali naturali tradizionali e tecnologie avanzate di fabbricazione digitale. La geometria del modulo, definita attraverso un processo iterativo di ottimizzazione, presenta facce esagonali di 12 cm, facce quadrate con lato di 7 cm e un'altezza complessiva di 17,14 cm. Queste proporzioni bilanciano requisiti ergonomici, strutturali e produttivi, garantendo un peso compatibile sia con la movimentazione manuale che con la manipolazione robotica.

Una caratteristica distintiva del sistema è la presenza di una cavità cilindrica interna con diametro di 4 cm. A differenza del modulo adottato nella prima fase sperimentale, caratterizzato da una configurazione piena, questa modifica progettuale è stata introdotta per consentire l'inserimento di una rete di rinforzo interna e ridurre il peso complessivo del modulo. Questa modifica permette anche di realizzare configurazioni in oggetto precedentemente non realizzabili con moduli pieni.

Proprio in virtù di queste caratteristiche geometriche e funzionali, il concio a forma di ottaedro troncato può essere considerato un *materiale digitale*. Ogni modulo rappresenta un'unità discreta progettata per aggregarsi secondo 14 connessioni predefinite tra facce. Le facce esagonali (0-7) possono essere accoppiate secondo otto combinazioni (0-4, 4-0, 1-5, 5-1, 2-6, 6-2, 3-7, 7-3), mentre le facce quadrate (8-13) permettono sei ulteriori

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

accoppiamenti (8–10, 10–8, 9–11, 11–9, 12–13, 13–12). Questa matrice di connessioni definisce le regole compositive dell'intero sistema, incarnando il concetto di materiale digitale. (Tav.21)

**14 connessioni:**

**Facce esagonali:**

faccia 0-4

faccia 4-0

faccia 1-5

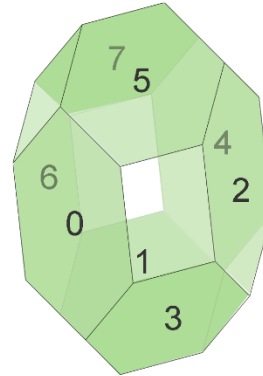
faccia 5-1

faccia 2-6

faccia 6-2

faccia 3-7

faccia 7-3



**Facce quadrate:**

faccia 8-10

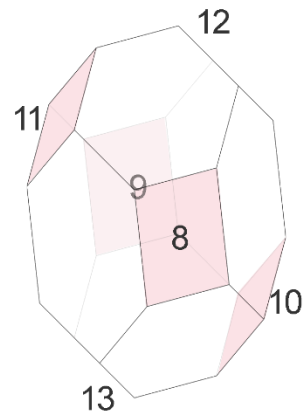
faccia 10-8

faccia 9-11

faccia 11-9

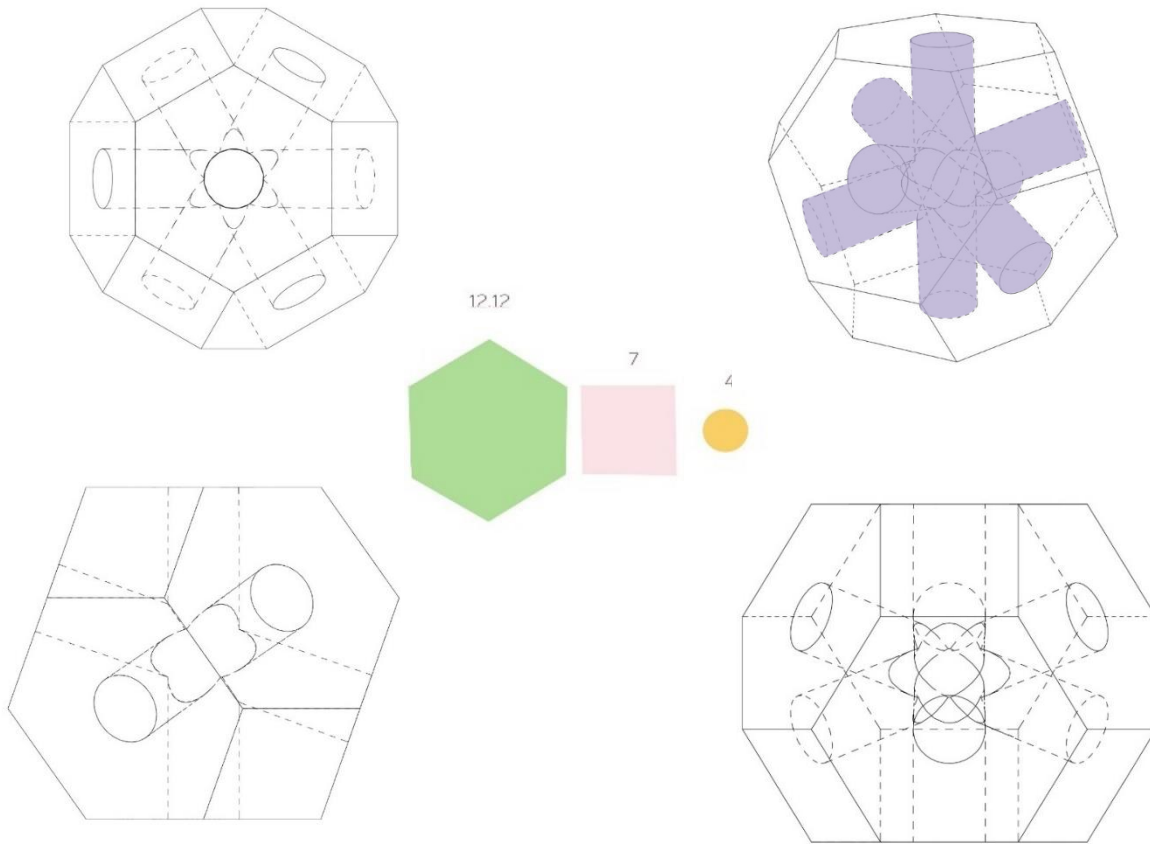
faccia 12-13

faccia 13-12



**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.22- Geometria del concio** - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

La ricerca ha condotto diverse prove di assemblaggio e aggregazione per esplorare il potenziale configurativo del modulo. Dallo studio sistematico delle possibilità di accoppiamento è emerso che il concio può essere assemblato sia sulla faccia esagonale sia su quella quadrata, permettendo di riempire lo spazio con configurazioni estremamente variabili.

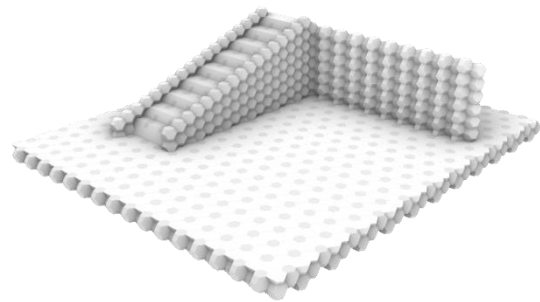
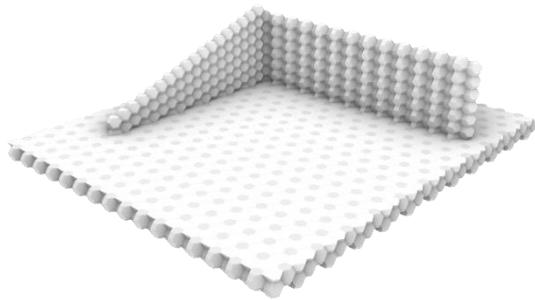
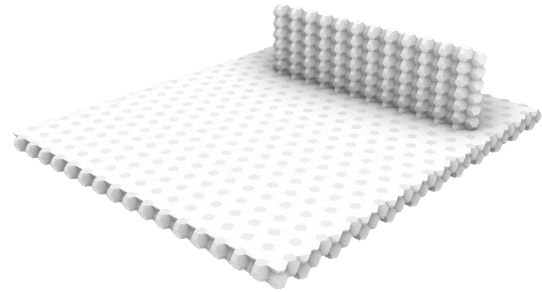
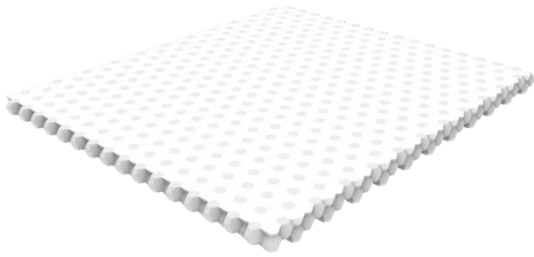
Ogni faccia del modulo può infatti interfacciarsi con la faccia corrispondente di un altro concio, generando una continuità geometrica che garantisce stabilità strutturale. L'orientamento reciproco dei conci e la scelta della faccia di contatto determinano la direzione di sviluppo della configurazione: l'accoppiamento attraverso le facce esagonali tende a generare aggregazioni compatte e massive, mentre l'accoppiamento attraverso le facce quadrate permette sviluppi più lineari e direzionali. La combinazione di entrambe le modalità all'interno della stessa configurazione consente di articolare lo spazio in modo complesso, alternando zone di densità e zone di vuoto secondo le esigenze funzionali.

È importante sottolineare che l'inserimento della rete interna di rinforzo è possibile solo quando il concio poggia sulla faccia esagonale, poiché la cavità cilindrica interna è orientata perpendicolarmente a queste facce e non consente il passaggio di rinforzi se il modulo è appoggiato sulla faccia quadrata. Questa caratteristica implica che solo le aggregazioni basate sulle facce esagonali possono sfruttare il rinforzo interno, incrementando la stabilità complessiva e permettendo configurazioni in oggetto altrimenti non realizzabili.

Le sperimentazioni condotte hanno verificato la capacità del sistema di generare elementi architettonici diversificati: piani orizzontali che definiscono superfici di calpestio o di appoggio, pareti verticali che delimitano spazi o forniscono supporto strutturale, scale che collegano quote differenti, sedute di varie altezze e conformazioni, e superfici inclinate che possono fungere da schienali o piani di lavoro. (Tav. 22-23).

Il processo di assemblaggio prevede il posizionamento dei conci secondo la configurazione desiderata, verificando che le facce si accoppino correttamente e che la struttura risultante sia stabile. Una volta definita la disposizione complessiva, gli interstizi tra i conci vengono riempiti con materiale più liquido, creando sia la continuità strutturale che superfici fruibili. Il materiale colato allo stato fluido all'interno degli spazi interstiziali, si adatta perfettamente alla geometria dei conci e, una volta indurito, forma un reticolo di rinforzo tridimensionale che attraversa l'intera configurazione.

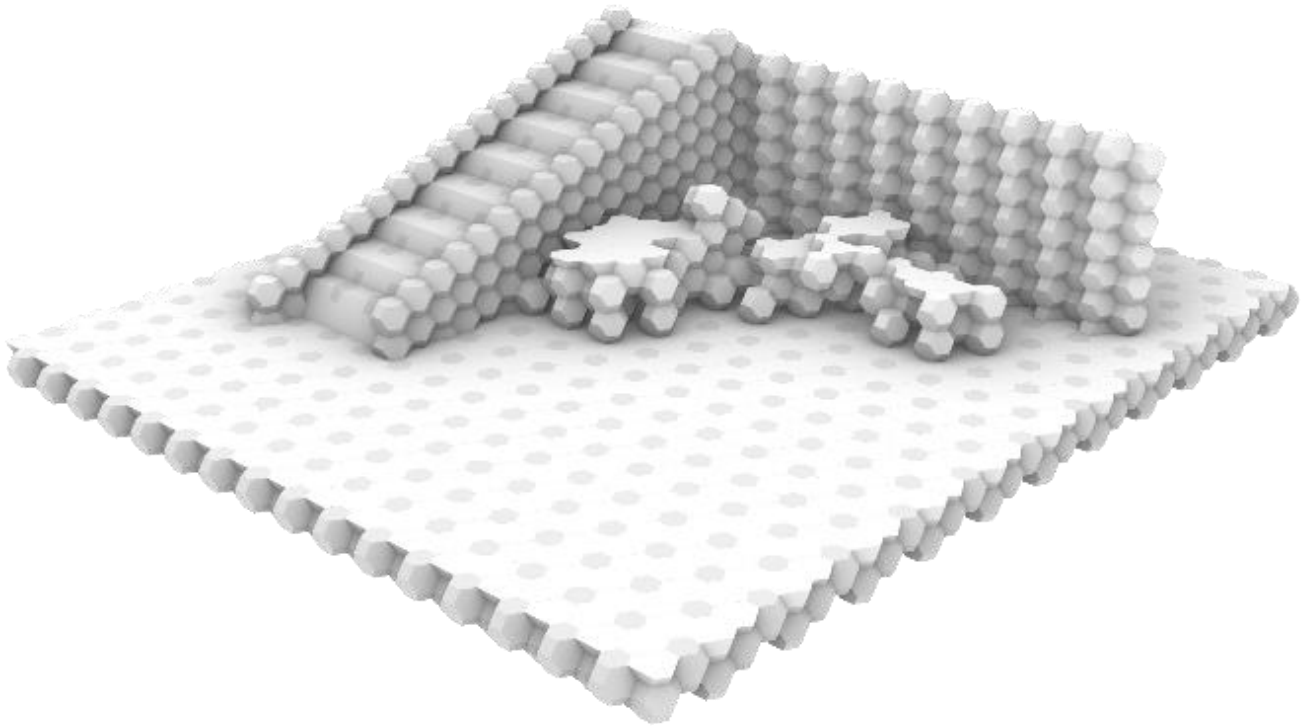
Il risultato è un sistema architettonico articolato in cui ogni configurazione emerge dalle regole di accoppiamento tra le facce dei moduli. La varietà compositiva deriva dalla combinazione di tre parametri: l'orientamento spaziale del concio, la sua posizione nella configurazione complessiva, e il tipo di faccia utilizzata per l'accoppiamento. Questa ricchezza combinatoria rende il sistema adattabile a contesti e funzioni differenti, mantenendo coerenza formale e costruttiva attraverso l'utilizzo di un unico elemento base.



**TAV.23-** Prove di configurazioni spaziali- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.24-** Prove di configurazioni spaziali- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

Per validare sperimentalmente le potenzialità del sistema modulare, la ricerca ha sviluppato un dimostratore alla scala dell'arredo urbano: Earth Beehive Bench, una seduta continua realizzata mediante assemblaggio di conci in terra cruda.

La scelta di sviluppare un elemento di seduta risponde innanzitutto a una precisa strategia di confronto metodologico con il dimostratore Vasemode Bench. Entrambi i prototipi condividono la medesima funzione e una scala dimensionale comparabile, permettendo un confronto diretto tra manifattura additiva diretta ed indiretta in termini di libertà formale, complessità realizzativa, consumo di materiale, tempi di produzione, reversibilità costruttiva e sostenibilità ambientale.

La scelta tipologica della seduta risponde inoltre a molteplici esigenze sperimentali e applicative. La scala dimensionale risulta compatibile con le risorse disponibili in laboratorio e consente agevolezza di trasporto e installazione. La funzione di seduta sottopone il sistema a sollecitazioni statiche verticali reali, permettendo di verificare la tenuta strutturale del sistema modulare in condizioni d'uso effettive e di testare gli aspetti ergonomici e di comfort in un contesto di utilizzo diretto.

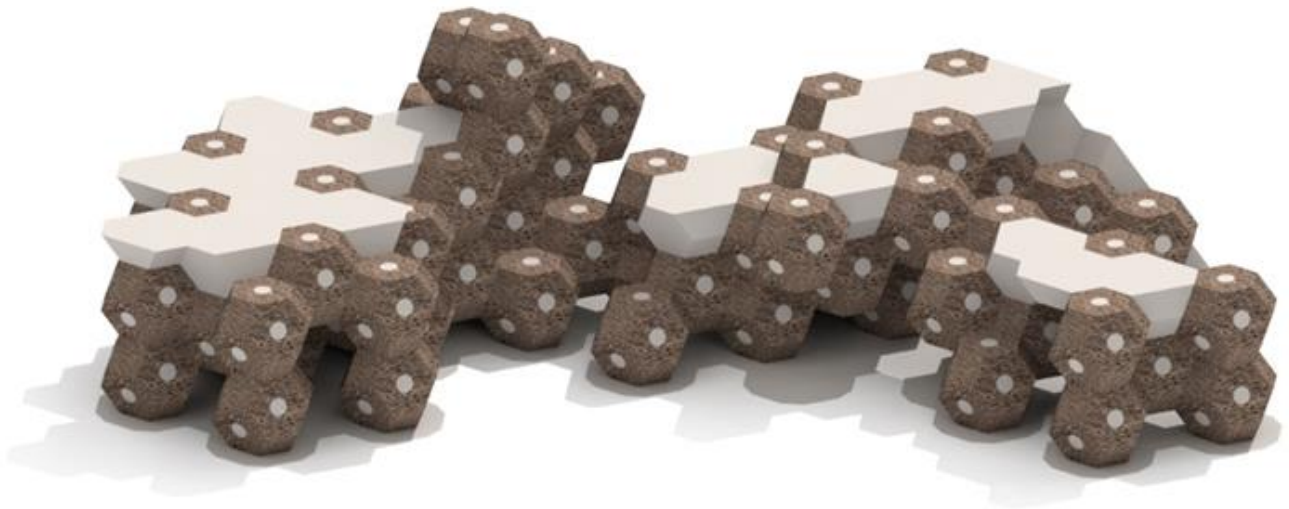
L'arredo urbano rappresenta inoltre un ambito applicativo immediatamente comprensibile e comunicabile, che dimostra la concreta trasferibilità della tecnologia dal laboratorio al contesto urbano reale. La seduta costituisce al contempo un sistema scalabile: le logiche di assemblaggio validate su questo prototipo possono essere estese ad altre funzioni quali tavoli, contenitori vegetali, pareti divisorie o elementi di delimitazione spaziale,

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

aprendo scenari applicativi differenziati a partire dal medesimo modulo base.

Mentre il Vasemode Bench esprime la continuità formale propria dei sistemi additivi diretti, Earth Beehive Bench esplora le logiche discrete della modularità, dove la forma complessiva emerge dalla combinazione regolata di unità base identiche.



**TAV.25-** Vista del dimostratore Earth Beehive Bench - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

#### 2.2.4 Applicazione pratica: realizzazione del prototipo Earth Beehive Bench

Per dimostrare la fattibilità del metodo di stampa indiretta applicato a strutture in terra cruda, è stata condotta una sperimentazione costruttiva presso il laboratorio Fablab Poliba, articolata in fasi successive di caratterizzazione materica, ottimizzazione dei dispositivi di formatura e validazione del sistema di assemblaggio.

La realizzazione del prototipo ha richiesto un approccio metodologico articolato in diverse fasi interconnesse, ciascuna caratterizzata da specifiche problematiche tecniche e da progressive ottimizzazioni derivanti dalle sperimentazioni condotte. Il processo complessivo si è sviluppato secondo tre macro-fasi sequenziali: la progettazione e fabbricazione della cassaforma mediante stampa 3D, la preparazione dell'impasto in terra cruda secondo proporzioni definite sperimentalmente, e infine le operazioni di riempimento ed essiccazione del concio. Questa strutturazione procedurale ha permesso di affrontare sistematicamente le criticità emerse durante le prove successive, conducendo a soluzioni tecniche sempre più raffinate e performanti.

## **Progettazione e fabbricazione della cassaforma**

La geometria poliedrica dell'ottaedro troncato, caratterizzata da superfici inclinate e spigoli definiti, richiede un'elevata precisione dimensionale e una ripetibilità difficilmente ottenibili con tecniche manuali convenzionali. La cassaforma è stata quindi progettata specificamente per la produzione mediante stampa 3D, al fine di garantire un controllo geometrico accurato e la replicabilità del processo produttivo.

La cassaforma costituisce un'evoluzione del sistema impiegato nel workshop Self Made Architecture V, mantenendo la configurazione bipartita composta da una metà inferiore e una superiore. Il nuovo prototipo introduce modifiche progettuali mirate, tra cui l'inserimento di un dentello perimetrale di circa 1 cm nella parte inferiore, che realizza un incastro meccanico con la parte superiore, impedendo rotazioni e spostamenti laterali durante le fasi di riempimento e compattazione.

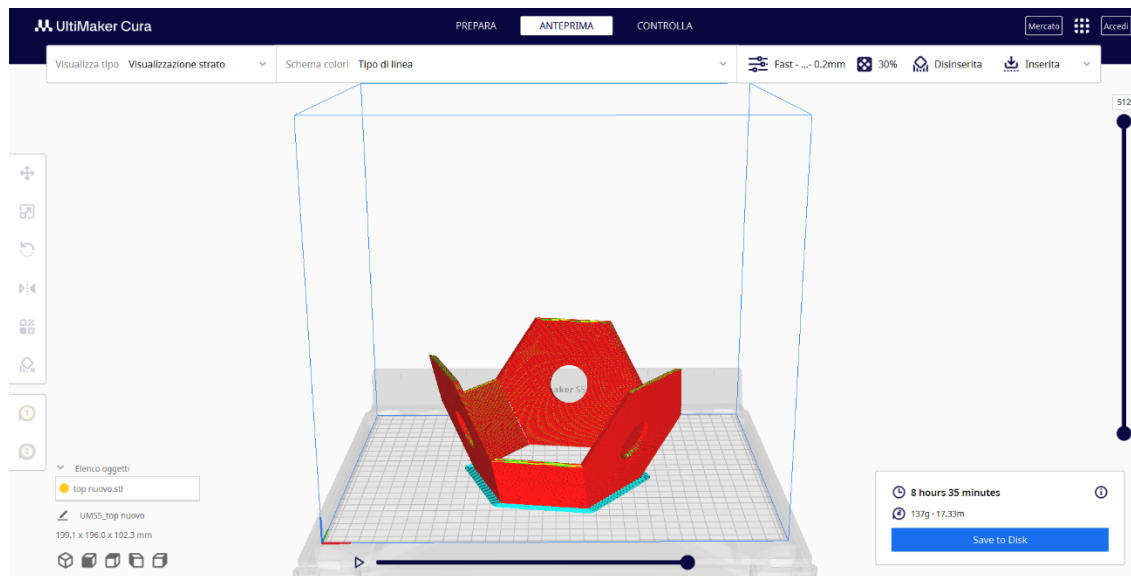
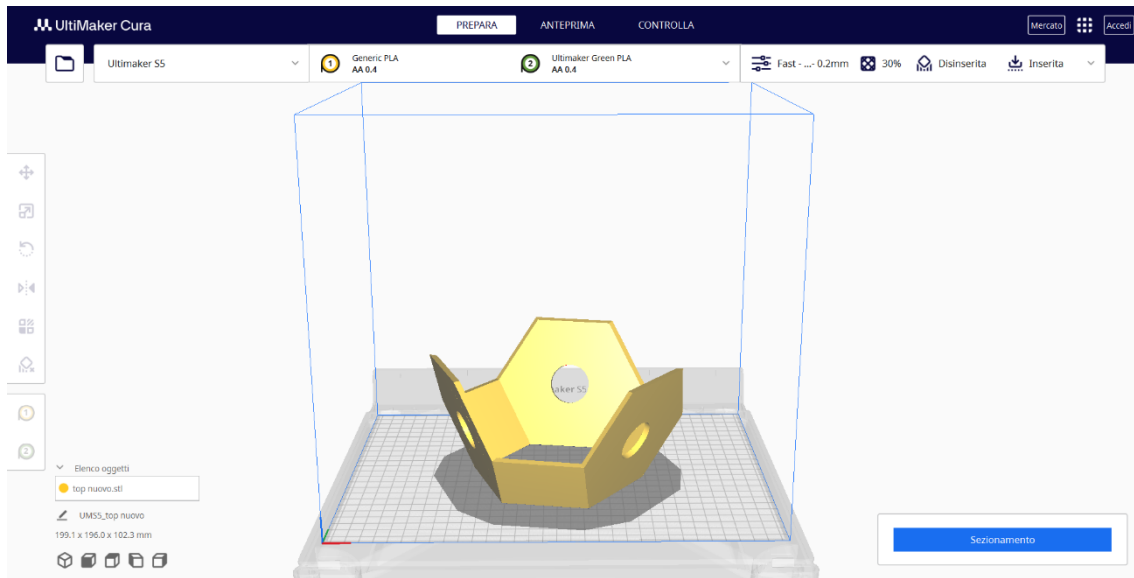
Caratterizzante è anche la cavità interna, ottenuta mediante l'inserimento di cilindri rimovibili. In particolare, il sistema è composto da un cilindro centrale, di maggiore altezza, che si innesta dalla sommità alla base del concio, e da una stella di cilindri laterali disposti a stella, che si innestano perpendicolarmente a partire dalle facce esagonali del concio.

La produzione delle casseforme è avvenuta attraverso un processo iterativo di ottimizzazione, in cui progettazione e fabbricazione si sono sviluppate in modo integrato. Il processo si è articolato in una sequenza ciclica di progettazione della geometria in ambiente CAD, ottimizzazione dei parametri di

stampa nel software di slicing Ultimaker per la generazione del codice, fabbricazione mediante stampante 3D Ultimaker S5 (volume di stampa 330 × 240 × 300 mm, L × P × A) e verifica del modello prodotto.

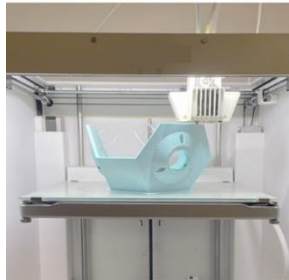
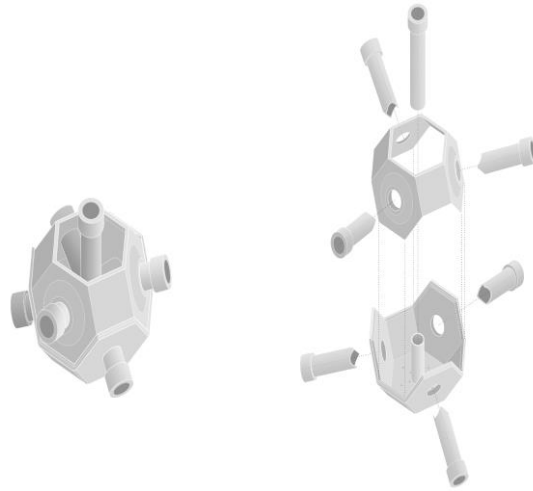
Le prime prove hanno evidenziato criticità nella fase di sformatura, principalmente legate all'adesione del materiale terroso alle superfici interne dello stampo. Sulla base di questi risultati, la geometria è stata progressivamente affinata mediante l'introduzione di angoli di sformo più accentuati e la riduzione localizzata dei sottosquadri. Durante l'intero ciclo produttivo, il modello digitale veniva continuamente aggiornato in risposta agli esiti sperimentali, consentendo di ottenere elementi sempre più regolari e dimensionalmente accurati.

Questo approccio iterativo evidenzia uno dei principali vantaggi della manifattura additiva: la possibilità di implementare rapidamente modifiche progettuali attraverso l'aggiornamento del modello digitale e la ristampa delle matrici ottimizzate, senza necessità di lavorazioni meccaniche o rilavorazioni di stampi permanenti.



**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.26- Creazione dello stampo-** © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10





## Caratterizzazione del materiale terroso



*Alla pagina  
precedente:  
Fig.31*

*©Earth Beehive  
Bench. Progetto  
MICS 6.10,*

Parallelamente all'ottimizzazione della cassaforma, l'avanzamento del prototipo ha richiesto un approccio metodologico fondato sulla sperimentazione diretta del materiale. Questa scelta risponde a una necessità legata alla natura del materiale terroso: la variabilità delle sue caratteristiche fisico-meccaniche, dipendenti dalla composizione geologica locale, dalla presenza di diverse frazioni granulometriche e dal contenuto di sostanze organiche, rende insufficiente un approccio puramente teorico. Solo attraverso la verifica diretta delle performance del materiale e della sua propensione alla lavorabilità è possibile sviluppare una conoscenza affidabile per l'ottimizzazione formale del manufatto.

La produzione e sperimentazione dei conci ha costituito il nucleo operativo della ricerca, permettendo di testare in condizioni reali le proprietà meccaniche e il comportamento in fase di essiccamento. Questa fase sperimentale si è sviluppata in parallelo con l'ottimizzazione della cassaforma, instaurando un rapporto dialettico tra forma e materia in cui la conoscenza delle proprietà del materiale informa e guida le scelte formali, mentre queste ultime vengono continuamente verificate e adattate in base ai risultati sperimentali.

Prima di procedere alla produzione dei conci, si è reso necessario condurre un'indagine sistematica sui terreni utilizzabili per la costruzione.

La letteratura tecnica specialistica mette a disposizione un corpus consolidato di metodologie di caratterizzazione che, pur nella loro apparente semplicità operativa, consentono di ottenere informazioni affidabili sulle proprietà del materiale.

Le prove di caratterizzazione adottate, definite analisi sul campo, si distinguono dalle prove di laboratorio per la loro accessibilità operativa. Non richiedendo strumenti sofisticati o attrezzature specialistiche, possono essere eseguite direttamente in cantiere, riducendo tempi e costi della caratterizzazione preliminare. Questa semplicità operativa non comporta una minore affidabilità: pur non raggiungendo la precisione quantitativa delle analisi di laboratorio, le prove sul campo forniscono indicazioni qualitative sufficientemente affidabili per orientare le scelte costruttive. In particolare, consentono di valutare la composizione prevalente del terreno (sabbiosa, limosa o argillosa) e di individuare la presenza di materiale organico incompatibile con l'impiego costruttivo.

Un primo accorgimento metodologico, preliminare a qualsiasi attività di caratterizzazione, riguarda le modalità di prelievo del materiale. È fondamentale escludere lo strato arabile superficiale, indicativamente i primi trenta centimetri, caratterizzato da un'elevata presenza di sostanze organiche. Questi componenti, sebbene preziosi in ambito agricolo per la fertilità del suolo, rappresentano un fattore di criticità per l'uso costruttivo, poiché soggetti a processi di decomposizione in grado di compromettere la stabilità dimensionale e la durabilità del manufatto.

La caratterizzazione del materiale terroso si articola infine in due categorie di prove complementari: gli esami di tipo sensoriale, che consentono una prima valutazione qualitativa immediata, e gli esami preliminari di qualità, finalizzati a una caratterizzazione più approfondita delle proprietà meccaniche e compositive.

### **I. Esami di Tipo Sensoriale**

Gli esami sensoriali rappresentano il primo livello di indagine, basandosi sull'osservazione diretta e sull'interazione fisica con il materiale. Questi test, pur nella loro apparente semplicità, forniscono indicazioni preziose sulla composizione granulometrica e sulla presenza delle diverse frazioni costitutive.

#### **a) Esame Visivo e Granulometrico**



L'esame visivo costituisce il primo approccio analitico con la terra in stato secco. L'osservazione diretta a occhio nudo della terra secca permette di valutare la differenziazione granulometrica, rilevando la presenza di ghiaie, sabbie e altre frazioni più fini, difficilmente distinguibili visivamente, costituite da elementi di diametro inferiore a 0,08 millimetri. Si tratta della frazione delle sabbie fini, dei limi e delle argille. È importante sottolineare che il colore della terra non rappresenta un indicatore affidabile di particolari qualità del materiale stesso, essendo semplicemente il risultato della predominanza di un determinato componente, che non influisce sulle prestazioni meccaniche della terra.

#### **b) Esame olfattivo**

L'esame olfattivo permette di valutare la presenza di elementi organici nella terra. Se umidificata o riscaldata, una terra contenente sostanze organiche presenterà un marcato odore di humus o muffa, indicativo della presenza di materiale in decomposizione che ne comprometterebbe l'utilizzo costruttivo. Al contrario, se la terra proviene da uno strato sedimentale sufficientemente profondo, risulterà priva di particolari odori, segno dell'assenza di componenti organiche significative.

#### **c) Test Tattile**

L'esame tattile prevede la manipolazione di una piccola quantità di terra nel palmo della mano, procedendo alla frantumazione di eventuali agglomerati mediante le dita dell'altra mano. La percezione di una sensazione abrasiva sulla superficie cutanea costituisce un indicatore della presenza di sabbia, la cui rugosità è dovuta alla dimensione e alla forma angolare dei granuli. La

presenza di agglomerati che oppongono resistenza variabile alla pressione digitale evidenzia invece la presenza di elementi collanti, principalmente argille. L'intensità della resistenza offerta da questi agglomerati alla compressione è direttamente proporzionale al contenuto argilloso del materiale: agglomerati che mantengono una coesione significativa anche sotto pressione segnalano un'elevata percentuale di frazione argillosa.



#### **d) Esame del lavaggio delle mani**

Questo esame è legato alla capacità della terra di reagire con l'acqua e aderire alla superficie cutanea, evidenziando la percentuale della componente colloidale. La procedura prevede di spalmare tra le mani della terra leggermente inumidita, aggiungendo progressivamente acqua abbondante fino a dilavarla quasi completamente. Le osservazioni permettono di distinguere tre tipologie compositive: se la terra è sabbiosa, le mani si sciacquano facilmente; se la terra è limosa, appare farinosa e non risulta eccessivamente difficile da sciacquare; se invece la terra è argillosa, produce una sensazione saponosa e le mani risultano difficili da lavare completamente.



## II. Esami Preliminari di Qualità

Gli esami preliminari di qualità costituiscono il secondo livello di caratterizzazione, permettendo di quantificare, sia pure in modo approssimativo, le proprietà meccaniche e il comportamento del materiale nelle diverse fasi di lavorazione ed essiccamento.

### a) Esame di penetrazione e aderenza



Questa prova si effettua utilizzando della terra con l'umidità necessaria a formare una pallina coesa. Mediante una lama o spatola, si osserva la facilità di penetrazione nel materiale e il residuo che aderisce alla superficie della lama durante l'estrazione. Se la lama si infila difficilmente e la terra vi aderisce

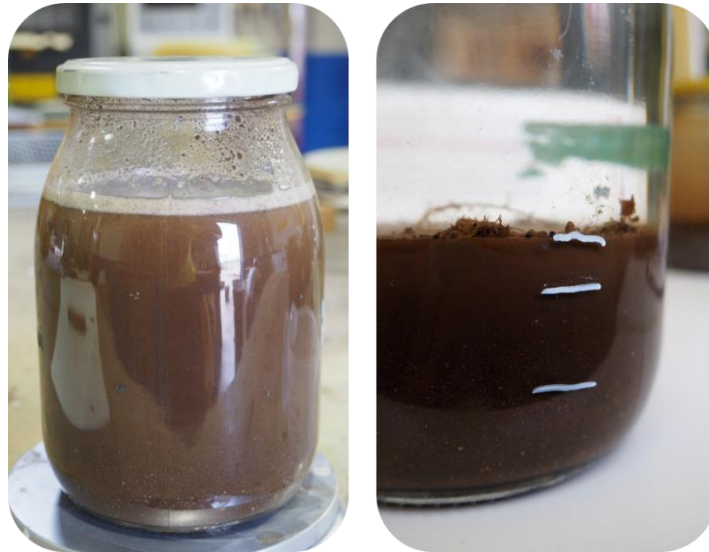
tenacemente quando viene sfilata, si è in presenza di una terra molto argillosa; se invece la spatola penetra agevolmente, la terra presenta una bassa percentuale di argilla.

**b) Esame della lucentezza**



Proseguendo con il test precedente, si procede tagliando la pallina di terra in due parti e osservando attentamente la superficie del taglio. Se la superficie si presenta opaca e leggermente sfarinata, si è in presenza di una terra limosa; se invece la superficie manifesta una certa lucentezza e plasticità, si tratta di una terra argillosa, indicativa di un'elevata presenza di minerali argillosi con proprietà colloidali.

### c) Prove di sedimentazione semplificata



Un flacone di vetro da un litro con fondo piatto viene riempito per un quarto di terra e per il rimanente di acqua. Si lascia riposare per permettere l'impregnazione delle particelle e si procede alla triturazione manuale degli agglomerati eventualmente presenti. Si agita quindi vigorosamente il contenitore e si lascia decantare per un'ora, dopodiché si agita nuovamente. Trascorsi circa 45 minuti, si osserva la stratificazione caratteristica: sabbia e ghiaia si depositano sul fondo, al di sopra si forma lo strato di limo e in superficie quello di argilla. Dopo otto ore, è possibile misurare con precisione la sedimentazione totale e degli strati singoli.

Per un impiego costruttivo ottimale, la terra dovrebbe presentare le seguenti percentuali compositive:

- Argilla: 10-20%
- Limo: 45-65%
- Sabbia: 20-40%

La quantità d'acqua contenuta nella terra può variare dal 15 al 35%, in funzione delle condizioni di prelievo e conservazione.

Le analisi condotte sul terreno locale hanno evidenziato una composizione caratterizzata da 40% di sabbia, 20% di argilla e 40% di limo. Questi valori, inseriti nel diagramma triangolare della tessitura del terreno mediante il software GeoGebra — strumento che permette di classificare il tipo di suolo in base alle percentuali relative delle tre frazioni granulometriche — hanno identificato il materiale come terreno franco. Questa classificazione indica un suolo caratterizzato da una presenza equilibrata di tutte le frazioni granulometriche, rappresentando una composizione ottimale per l'impiego costruttivo. I terreni franchi infatti combinano le proprietà leganti dell'argilla, la lavorabilità conferita dal limo e la stabilità dimensionale garantita dalla sabbia, risultando particolarmente adatti alla realizzazione di elementi in terra cruda compattata.

La fase preliminare di test empirici ha quindi confermato che il materiale presentava un contenuto argilloso sufficiente a garantire la ritenzione della forma durante la fase di compattazione nel concio e il successivo processo di essiccazione, validando la possibilità di procedere con la produzione dei componenti senza necessità di importare terre selezionate o di apportare correzioni significative alla composizione naturale del materiale.

Scegliere le frazioni per le quali si dispone di dati  
(la terza viene calcolata per differenza)

Sabbia e Argilla

Sabbia e Limo

Limo e Argilla

sabbia = 38

argilla = 21

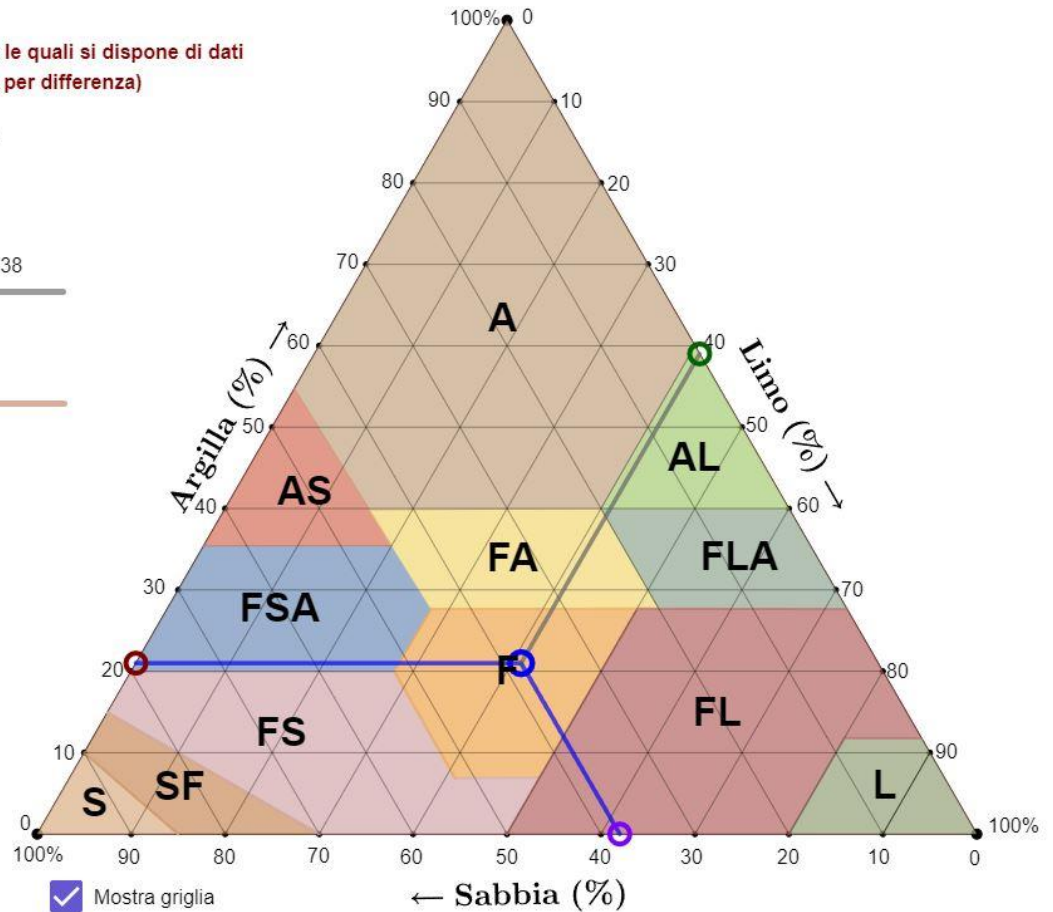
**F**

franco

sabbia: 38 %

limo: 41 %

argilla: 21 %



TAV.27- Triangolo della tessitura dei suoli riferito al sistema USDA- GeoGebra

#### d) Esame del ritiro lineare



Si prepara un elemento cilindrico (sigaro) con terra plastica, lasciandolo essiccare al sole per tre giorni o all'ombra per sette giorni. Trascorso questo intervallo temporale, si esercita una pressione verso una delle estremità misurando il ritiro lineare del campione. Questo test è particolarmente significativo in quanto il ritiro eccessivo durante l'essiccamento può causare fessurazioni e compromettere l'integrità strutturale del manufatto. La

classificazione della qualità della terra in base al ritiro è la seguente: ritiro inferiore al 5% indica terre di buona qualità, ritiro fino al 10% terre di qualità discreta, ritiro fino al 15% terre di qualità scadente.

Nel caso specifico del terreno testato, il campione cilindrico presentava una lunghezza iniziale di 30 cm al giorno zero. Dopo tre giorni di essiccazione al sole, la lunghezza si è ridotta a circa 27 cm, corrispondente a un ritiro lineare del 10%.

Questo valore colloca il materiale al limite superiore della categoria "terre di qualità discreta", suggerendo una percentuale argillosa significativa che, se da un lato garantisce buone proprietà leganti, dall'altro richiede particolare attenzione durante la fase di essiccazione per minimizzare il rischio di fessurazioni.

Il risultato ha orientato le scelte successive nella formulazione dell'impasto, in particolare per quanto riguarda l'integrazione di fibre di paglia di lunghezza adeguata (5-10 cm) che, fungendo da armatura diffusa, sono risultate essenziali per contrastare le tensioni indotte dal ritiro e prevenire la formazione di lesioni durante l'essiccazione dei concii.

#### **e) Esame del sigaro**

Variante del test di ritiro lineare, questa prova consiste nel formare un elemento cilindrico allungato (sigaro) di terra plastica, osservandone il comportamento durante la manipolazione e l'essiccamento. La capacità del materiale di mantenere la forma

cilindrica senza fratturarsi indica un buon equilibrio tra le diverse frazioni granulometriche.

#### **f) Prova di consistenza**

Questa prova valuta la plasticità del materiale attraverso la formazione di elementi cilindrici di diametro progressivamente ridotto. Si forma un cilindro di terra e lo si assottiglia progressivamente mediante rotolamento su una superficie piana. Il diametro minimo raggiungibile prima della fratturazione indica il grado di plasticità: terre molto argillose permettono di raggiungere diametri molto ridotti (2-3 mm), mentre terre sabbiose si fratturano con diametri maggiori.

#### **g) Resistenza a secco**





Con terra setacciata (maglia 0,4 mm) si formano elementi discoidali (biscotti) di circa 8 cm di diametro e 1 cm di spessore, lasciati essiccare completamente. La prova di rottura permette di valutare la resistenza meccanica del materiale indurito: difficile da rompere senza polverizzazione indica terra argillosa con buone proprietà leganti, mediamente resistente con polverizzazione sotto pressione indica terra con argilla limosa, facile da rompere con polverizzazione completa indica terra sabbiosa o povera di argilla. Questa prova fornisce un'indicazione diretta sulla percentuale di argilla presente e sulla qualità legante del materiale.

Nel caso del terreno testato, i campioni hanno manifestato una resistenza media, rompendosi con polverizzazione parziale sotto pressione. Questo risultato conferma la presenza di una terra con argilla limosa, coerente con la composizione evidenziata dalla prova di sedimentazione.

Le analisi condotte hanno confermato l'idoneità del terreno locale per la produzione dei conci. Il materiale è stato classificato come terreno franco (40% sabbia, 20% argilla, 40% limo), caratterizzato da una presenza equilibrata delle frazioni granulometriche che combina proprietà leganti, lavorabilità e stabilità dimensionale.

Il valore di ritiro lineare pari al 10% ha evidenziato la necessità di particolare attenzione durante l'essiccazione e ha orientato la scelta di integrare fibre di paglia di lunghezza adeguata (5-10 cm) per contrastare le tensioni indotte dal ritiro e prevenire fessurazioni.

La caratterizzazione ha quindi validato la possibilità di procedere con la produzione utilizzando il materiale locale senza necessità di correzioni significative alla sua composizione naturale.

### **Preparazione dell'impasto in terra cruda**

Sulla base dei risultati della caratterizzazione materica, che ha confermato l'idoneità del terreno, è stata sviluppata una formulazione dell'impasto volta a bilanciare lavorabilità, resistenza meccanica e stabilità dimensionale.

Il primo passo operativo consiste nel setacciare accuratamente terra e sabbia, eliminando componenti organiche residue e particelle troppo grosse che comprometterebbero la stabilità del prodotto finale. La terra proviene da terreni agricoli locali, mentre la sabbia di cava, materiale inerte, migliora la lavorabilità dell'impasto e riduce le fessurazioni da ritiro.

La paglia secca è il componente chiave per contrastare le tensioni da ritiro evidenziate nei test preliminari. Viene prima immersa in acqua per alcune ore, quindi lasciata asciugare al sole, mantenendo un'umidità residua che facilita l'adesione con la matrice terrosa. Le prime sperimentazioni con fibre corte (circa 2 cm) hanno prodotto fessurazioni superficiali e strutturali, coerenti con il ritiro del 10%. L'adozione di fibre più lunghe, tra 5 e 10 cm, ha ridotto drasticamente le lesioni durante l'essiccazione, migliorando la coesione del materiale.

La miscelazione inizia manualmente con un'asta lignea per i componenti asciutti e prosegue con un miscelatore elettrico una volta raggiunta la consistenza plastica, garantendo un'omogeneizzazione completa. Le proporzioni dei componenti sono state ottimizzate attraverso prove successive, bilanciando plasticità sufficiente per il riempimento e la compattazione della cassaforma, contenuto d'acqua limitato per ridurre essiccazione e ritiro volumetrico, quantità adeguata di fibre per la resistenza a trazione e legante argilloso per coesione e durabilità.

Una volta miscelati, l'impasto riposa per circa mezz'ora, periodo in cui si completano l'idratazione delle particelle argillose e la distribuzione capillare dell'umidità. Dopo un breve rimescolamento per uniformare eventuali accumuli locali, l'impasto viene coperto con un telo di plastica e lasciato maturare per circa sei ore. Solo a questo punto è pronto per il riempimento della cassaforma.

## Processo di produzione dei conci

Le operazioni di riempimento richiedono tecnica e esperienza per garantire un risultato ottimale. Prima di iniziare, le superfici interne della cassaforma vengono cosparse con sabbia fine, creando uno strato distaccante che facilita la sformatura.

La fase iniziale prevede il caricamento della metà inferiore della cassaforma con il solo cilindro centrale inserito. È fondamentale distribuire uniformemente il materiale negli spigoli della geometria poliedrica, prestando attenzione a compattare progressivamente gli strati per eliminare bolle d'aria e garantire densità omogenea.

Successivamente si inseriscono i tre cilindri inferiori, ortogonali alle rispettive facce esagonali, continuando il riempimento e la compattazione attorno ad essi per assicurare l'adesione tra terra e superfici cilindriche. Completata la metà inferiore, si posiziona la metà superiore, allineandola con il dentello perimetrale, e si ripete la procedura: caricamento progressivo, compattazione, inserimento dei tre cilindri superiori e completamento del riempimento.

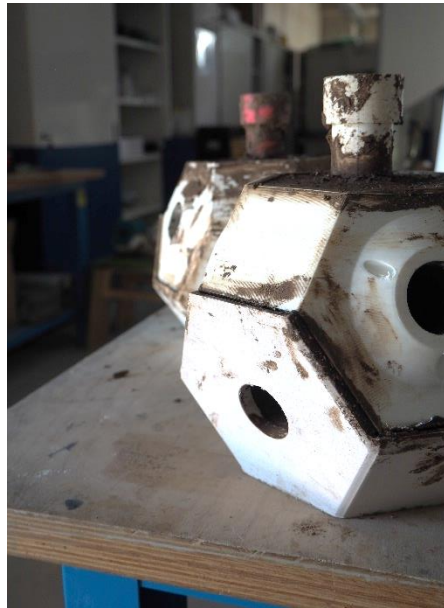
Nella fase finale, occorre verificare che la terra non fuoriesca lungo la giunzione tra le due metà dello stampo, per preservare la qualità delle superfici esterne. La superficie apicale del concio viene quindi livellata con una cazzuola, creando un piano uniforme che costituirà una delle facce esagonali dell'elemento finito.



Alla *pagina*  
successiva:  
Fig.32

Processo *di*  
produzione dei conci

© Earth Beehive  
Bench | Progetto  
MICS 6.10



## Fase di essiccazione e sformatura

L'essiccazione rappresenta il momento più critico, durante il quale avvengono evaporazione dell'acqua, ritiro volumetrico e consolidamento progressivo della struttura interna. Questo processo deve svolgersi in ambiente controllato, con temperatura e umidità costanti, poiché shock termici o variazioni rapide possono provocare fessurazioni superficiali e strutturali.

I tempi di essiccazione variano in base alle condizioni climatiche. In condizioni medie, tra le 24 e le 48 ore successive al completamento del riempimento, quando il materiale ha perso parte dell'acqua superficiale, è possibile estrarre i cilindri interni. L'operazione va eseguita con delicatezza, ruotando leggermente ciascun cilindro prima di estrarlo assialmente, per rompere eventuali adesioni senza danneggiare il concio ancora parzialmente umido.

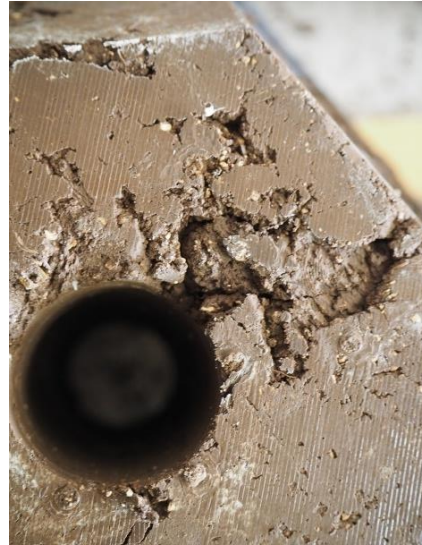
L'essiccazione completa richiede generalmente 10-15 giorni, fino al raggiungimento di un equilibrio igroscopico con l'ambiente circostante. Durante questo periodo è consigliabile capovolgere periodicamente il concio, appoggiandolo alternativamente sulle diverse facce esagonali, per evitare accumuli d'acqua e garantire un'essiccazione uniforme, riducendo il rischio di fessurazioni o deformazioni della geometria finale.



Alla *pagina*  
successiva:  
Fig.33

*Fase di essiccazione  
e sformatura*

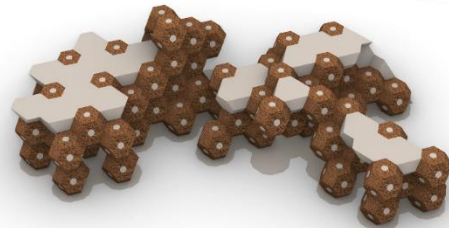
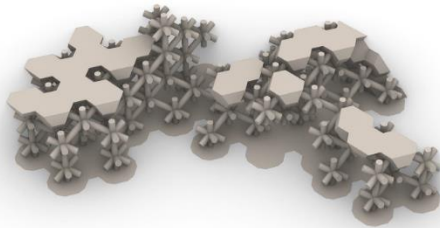
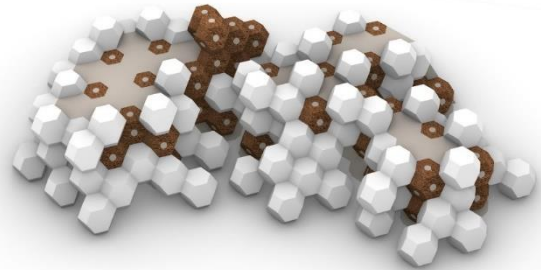
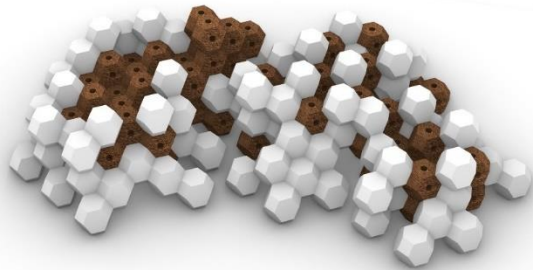
© Earth Beehive  
Bench | Progetto  
MICS 6.10



### **Sistema di assemblaggio e processo costruttivo**

Una volta completata l'essiccazione dei conci — fase essenziale per il raggiungimento delle resistenze meccaniche e la stabilizzazione dimensionale — si è definito il sistema di assemblaggio.

Il processo costruttivo prevede innanzitutto il posizionamento dei conci cavi secondo la configurazione stabilita dal modello digitale, verificando l'accoppiamento delle facce e la stabilità complessiva dell'aggregazione. I conci vengono quindi delimitati perimetralmente mediante altri conci, pieni, che fungono da cassaforma temporanea. Questa cerchiatura ha una duplice funzione: contiene il materiale liquido durante il colaggio e definisce i piani planari che costituiranno le superfici di seduta e di appoggio. Il sistema di cerchiatura consente il riempimento controllato delle cavità interne dei conci forati, creando una rete di rinforzo strutturale in materiale geopolimerico che interconnette gli elementi assemblati. Una volta completata l'asciugatura e la maturazione del materiale, i conci pieni utilizzati come cassaforma temporanea vengono rimossi, rivelando l'oggetto ultimato con le superfici planari definite e la rete interna solidificata. Questo metodo permette di ottenere un elemento architettonico funzionale attraverso l'assemblaggio a secco di componenti modulari, eliminando la necessità di casseforme tradizionali e consentendo il riutilizzo dei conci di cerchiatura in successive configurazioni. Il materiale colato all'interno delle cavità crea continuità strutturale tra i moduli, garantendo stabilità meccanica e definendo al contempo le superfici fruibili.



**TAV.28-** Fasi del processo costruttivo di Earth Beehive Bench - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

Per validare il processo costruttivo ipotizzato e verificarne la fattibilità operativa, si è proceduto alla realizzazione del dimostratore Earth Beehive Bench presso il laboratorio Fablab Poliba. È stata predisposta una pedana come basamento, simulando le condizioni di appoggio previste per l'applicazione reale, e i conci essiccati sono stati posizionati secondo la configurazione definita dal modello digitale. Durante questa fase preliminare è stata verificata la compatibilità dimensionale tra gli elementi prodotti, valutando eventuali scostamenti rispetto alle tolleranze di progetto, la precisione del loro accoppiamento geometrico nelle diverse modalità di connessione tra facce esagonali e quadrate, e la stabilità della configurazione assemblata in assenza di elementi di fissaggio o leganti.

Una volta definita e verificata la disposizione dei conci cavi, si è proceduto alla realizzazione del sistema di contenimento per il colaggio del materiale geopolimerico. Inizialmente era stato ipotizzato l'utilizzo di conci pieni in terra cruda come casseforme temporanee, seguendo una logica di coerenza materica e reversibilità del sistema costruttivo. Tuttavia, durante la fase di realizzazione pratica sono emerse significative criticità operative, in particolare per quanto riguarda le operazioni di smontaggio della cerchiatura dopo la maturazione del geopolimero, che avrebbero potuto compromettere l'integrità delle superfici finite.

Si è quindi adottato un sistema alternativo basato su pannelli in legno sagomati secondo le geometrie richieste, realizzati mediante taglio laser. Questi elementi planari sono stati posizionati parallelamente alle facce dei conci, definendo con precisione i piani di seduta e le superfici fruibili.



Alla *pagina*  
successiva:  
Fig.34

*Fase di costruzione:*  
*posizionamento*  
*conci*

© Earth Beehive  
Bench | Progetto  
MICS 6.10



Una volta assemblato il sistema di contenimento e verificata la tenuta delle connessioni, si è proceduto al colaggio del materiale geopolimerico all'interno delle cavità e negli spazi delimitati dai pannelli sagomati.

Questo sistema ha permesso di superare le difficoltà operative emerse durante la sperimentazione, garantendo maggiore controllo sulla definizione geometrica delle superfici planari, facilità di smontaggio senza rischio di danneggiamento, e possibilità di riutilizzo delle casseforme sagomate in configurazioni successive, mantenendo così la logica di ottimizzazione delle risorse e reversibilità del processo costruttivo.

Il riempimento delle cavità interne con materiale geopolimerico assolve molteplici funzioni strutturali e funzionali. Dal punto di vista strutturale, incrementa la massa complessiva dell'elemento migliorando la stabilità contro ribaltamento e traslazione, ottimizza il comportamento meccanico fornendo continuità tra i conci assemblati e trasformando un sistema discreto di elementi giustapposti in una struttura monolitica, e crea una rete di rinforzo tridimensionale che attraversa l'intera configurazione garantendo l'integrità strutturale anche in presenza di sollecitazioni localizzate. Dal punto di vista funzionale, il materiale geopolimerico colato in corrispondenza dei piani di seduta genera le superfici planari necessarie per rendere fruibile l'arredo urbano, evitando le discontinuità che deriverebbero dal semplice accostamento dei conci modulari.



Alla pagina  
successiva:  
Fig.35

*Fase di costruzione:  
posizionamento dei  
piani di contenimento*

© Earth Beehive  
Bench | Progetto  
MICS 6.10



I piani di cerchiatura svolgono quindi un ruolo determinante nel processo costruttivo: agiscono come casseforme che contengono il materiale fluido durante la fase di colaggio, impedendone la dispersione e garantendo la definizione precisa delle superfici planari; fungono da supporti strutturali temporanei che stabilizzano la configurazione durante le operazioni di riempimento e maturazione del geopolimero; e definiscono geometricamente i piani di seduta attraverso la loro disposizione spaziale, trasferendo al negativo la geometria modulare del sistema.

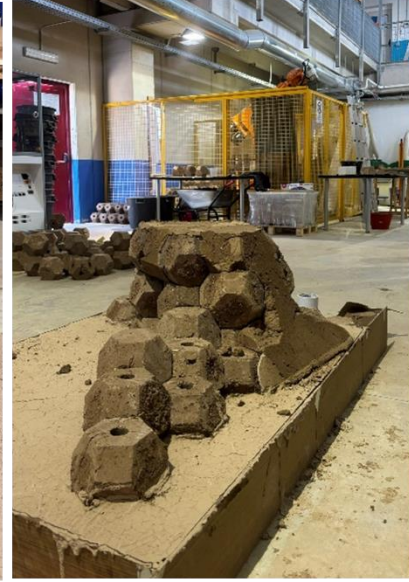
Una volta completata la maturazione del geopolimero — processo che richiede indicativamente 24-48 ore per il consolidamento iniziale e 7-14 giorni per il raggiungimento delle resistenze meccaniche target — i piani di cerchiatura vengono rimossi mediante semplice smontaggio a secco, rivelando il dimostratore ultimato. I piani di seduta si presentano caratterizzati da tagli netti e geometrie rigorose che richiamano formalmente l'ottaedro troncato, creando una continuità visiva tra la logica modulare del sistema costruttivo e la configurazione architettonica finale. Il geopolimero indurito contribuisce al rinforzo strutturale in tre posizioni strategiche — alla base dell'elemento, dove garantisce l'ancoraggio e la distribuzione dei carichi, all'interno del reticolo formato dalle stelle cilindriche, dove crea una struttura tridimensionale resistente, e in corrispondenza dei piani di seduta, dove fornisce la resistenza necessaria a sopportare i carichi d'uso — garantendo stabilità complessiva, continuità meccanica e prestazioni adeguate all'uso previsto come arredo urbano permanente.



Alla pagina  
successiva:  
Fig.36

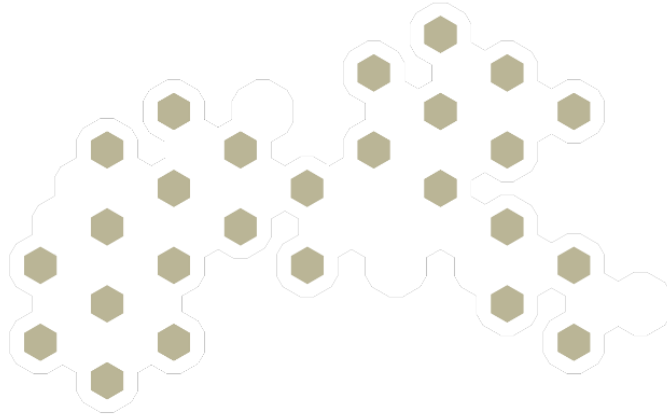
Fase di costruzione:  
smontaggio dei piani

© Earth Beehive  
Bench | Progetto  
MICS 6.10

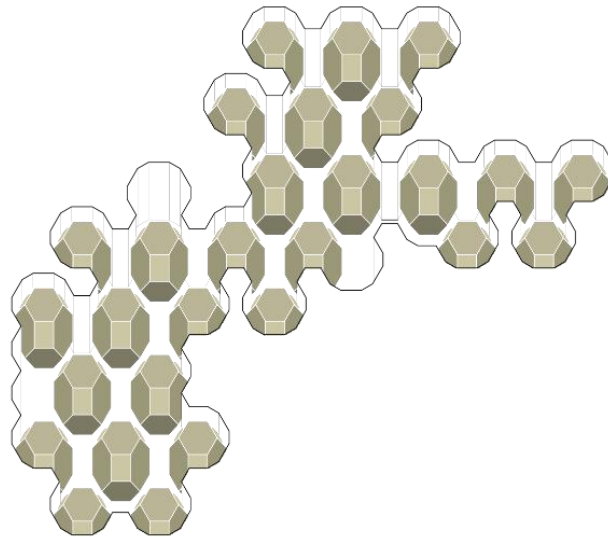


**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



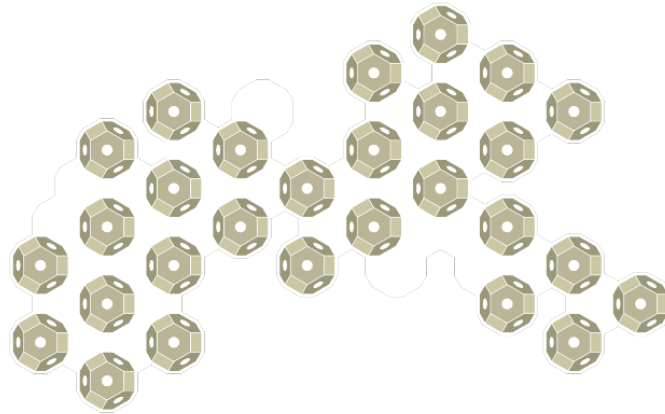
**TAV.29-** Pianta livello 00 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



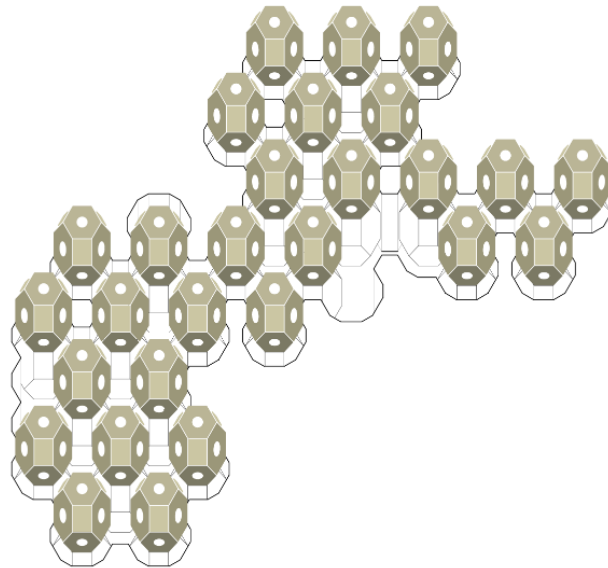
**TAV.30-** Vista assonometrica- livello 00 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



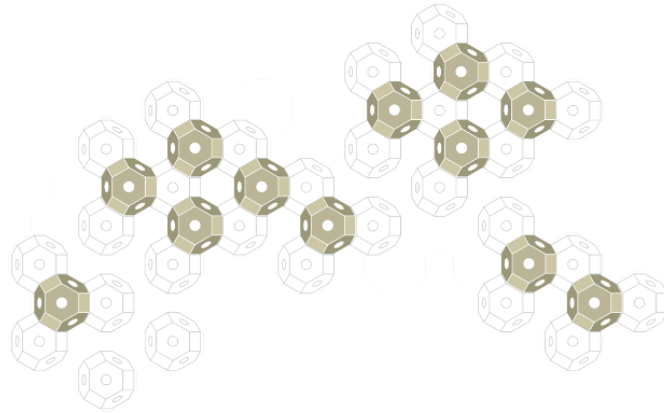
**TAV.31-** Pianta livello 01 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



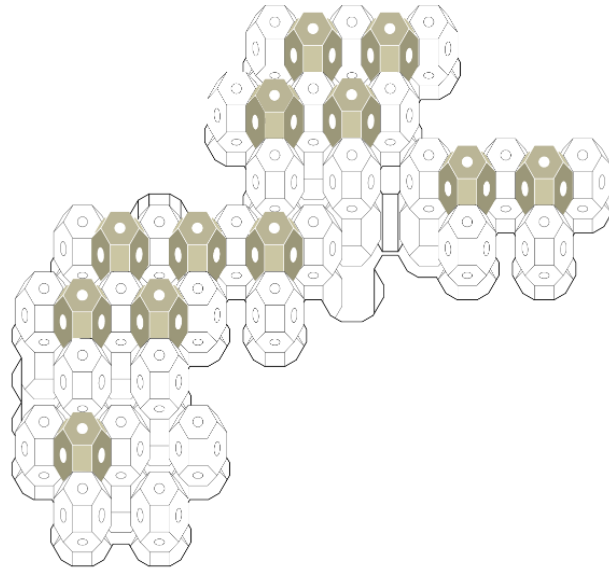
**TAV.32-** Vista assonometrica- livello 01- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



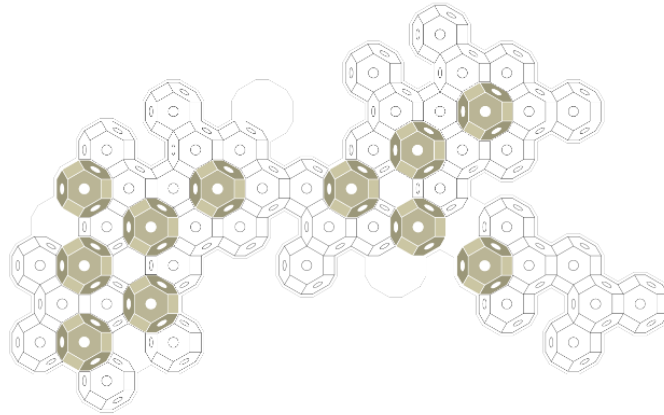
**TAV.33-** Pianta livello 02 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



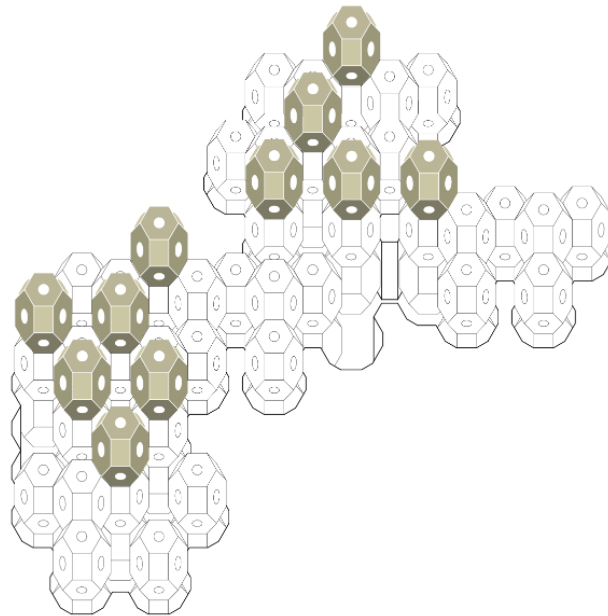
**TAV.34-** Vista assonometrica- livello 02 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



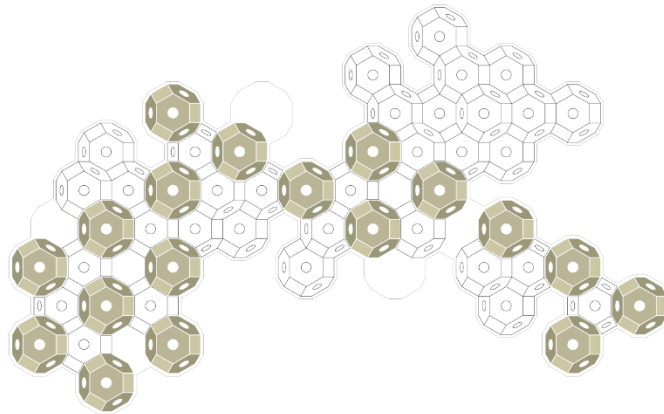
**TAV.35-** Pianta livello 03 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



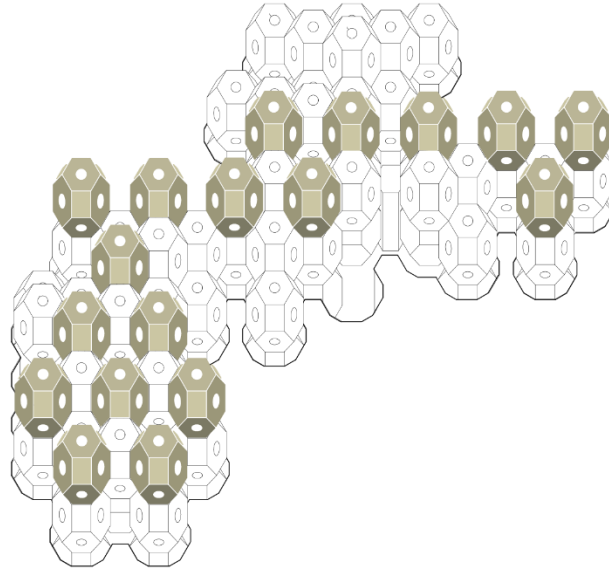
**TAV.36-** Vista assonometrica- livello 03 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



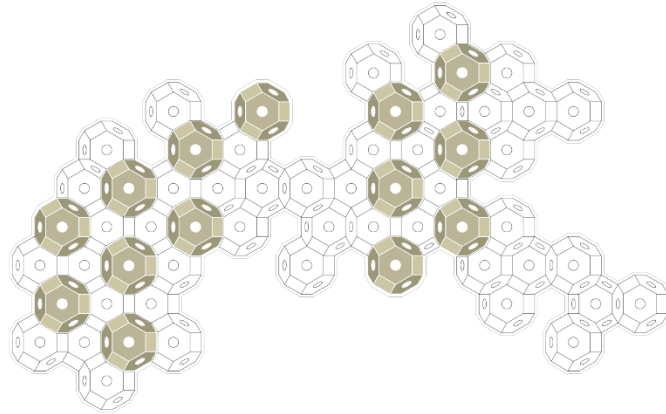
**TAV.37-** Pianta livello 04 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



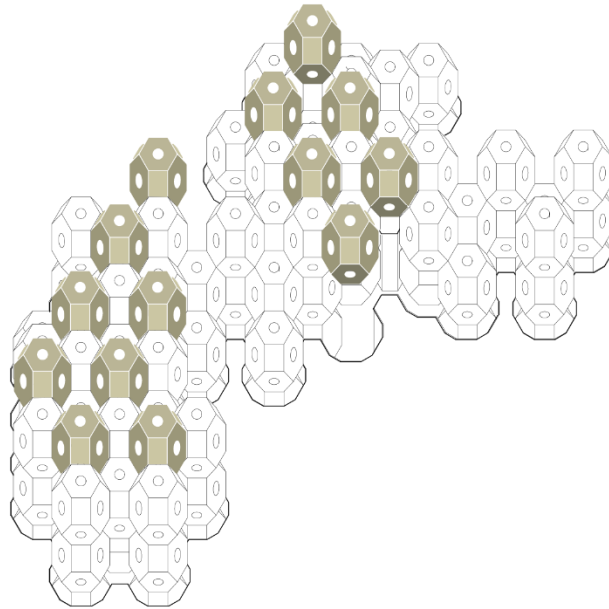
**TAV.38-** Vista assonometrica- livello 04 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.39-** Pianta livello 05- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



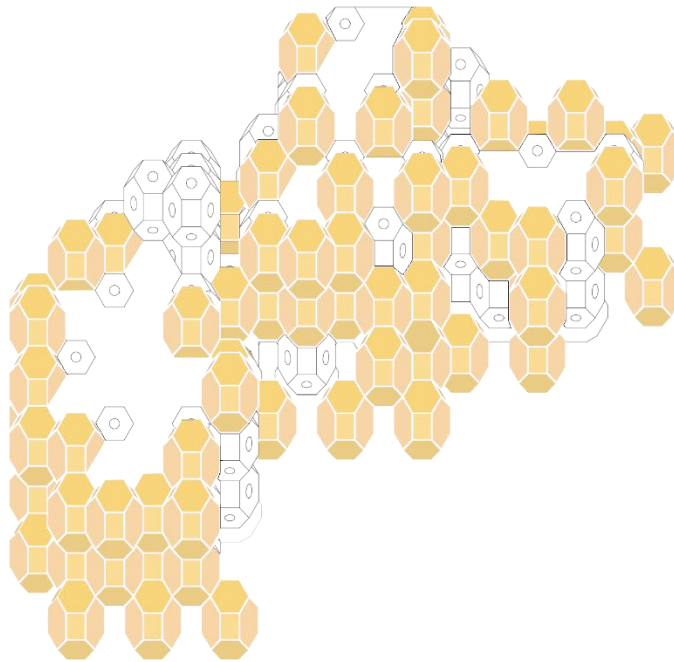
**TAV.40-** Vista assonometrica- livello 05 - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



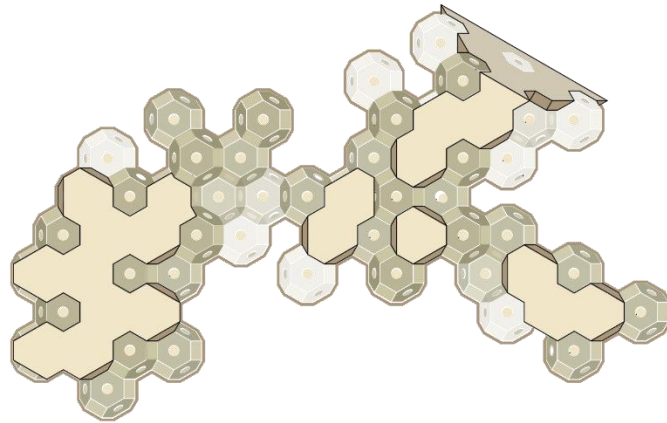
**TAV.41-** Pianta conci di supporto - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



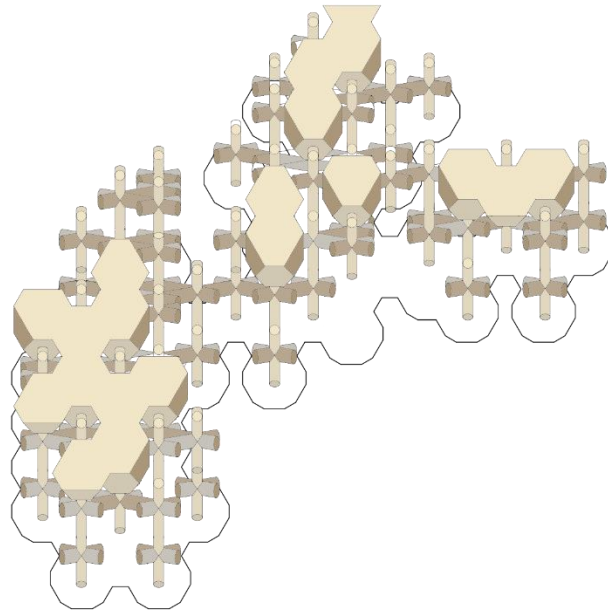
**TAV.42-** Vista assonometrica con concetti di supporto - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



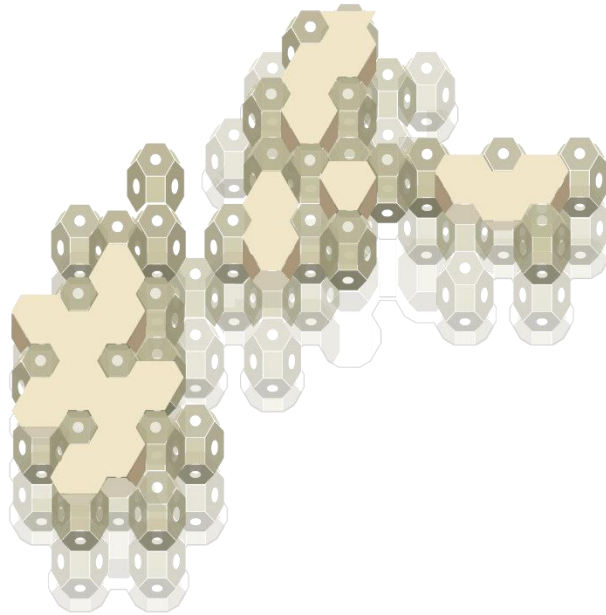
**TAV.43-** Pianta completa - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



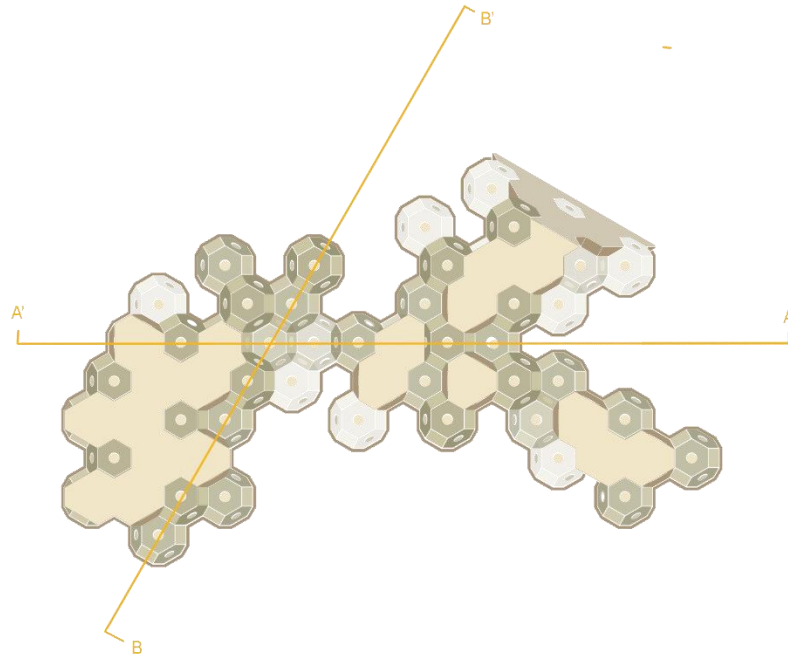
**TAV.44-** Vista assonometrica rete di rinforzo interna- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



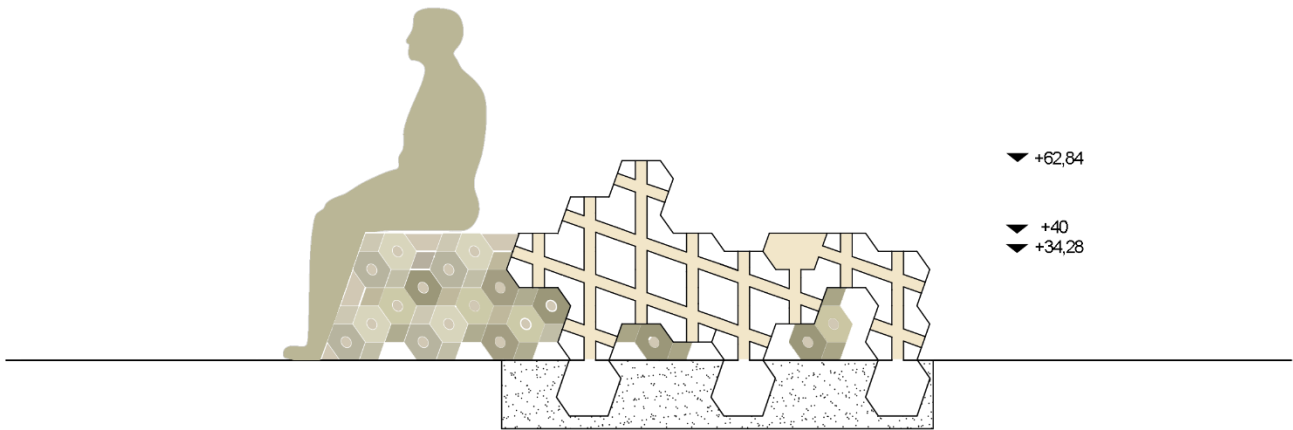
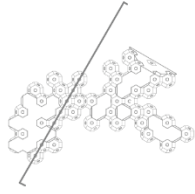
**TAV.45-** Vista assonometrica completa- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



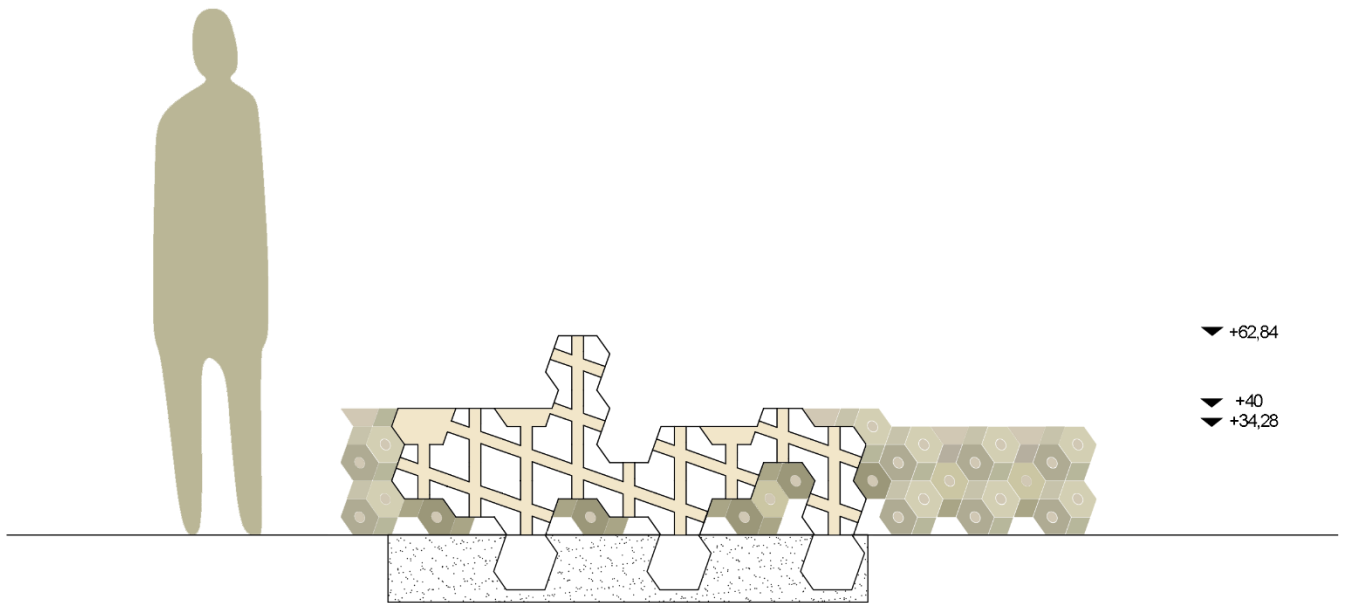
**TAV.46-** Pianta sezioni - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.47-** Sezione AA' - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10



**TAV.48-** Sezione AA' - © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

La sperimentazione condotta sul prototipo Earth Beehive Bench apre prospettive applicative significative per la tecnologia di manifattura additiva indiretta nel campo dell'arredo urbano e dell'architettura del paesaggio, suggerendo scenari di implementazione che trascendono la dimensione puramente tecnica per configurarsi come strategie di intervento sul territorio.

L'elemento, caratterizzato dalla texture stratificata e dalla materialità naturale della terra cruda, si presta a molteplici configurazioni spaziali e funzionali. La disposizione di componenti di questo tipo nello spazio pubblico può generare sistemi articolati di sosta e relazione, sfruttando le proprietà termiche del materiale terroso e la sua naturale capacità di regolazione igrometrica.

La tecnologia di manifattura additiva indiretta consente la generazione di intere famiglie di componenti modulari che mantengono coerenza estetica e tecnologica. Accanto agli elementi seduta possono essere sviluppati contenitori vegetali, elementi di delimitazione spaziale, supporti per illuminazione, consentendo la creazione di infrastrutture urbane integrate caratterizzate da forte identità materica e da elevata sostenibilità ambientale.

La modularità intrinseca al processo digitale apre scenari di estrema flessibilità compositiva. La possibilità di generare configurazioni variabili attraverso la modifica parametrica delle regole di assemblaggio consente la creazione di soluzioni spaziali adattabili a contesti urbani diversificati: dalle piazze pedonali ai

parchi pubblici, dai cortili scolastici alle aree di pertinenza di edifici residenziali.

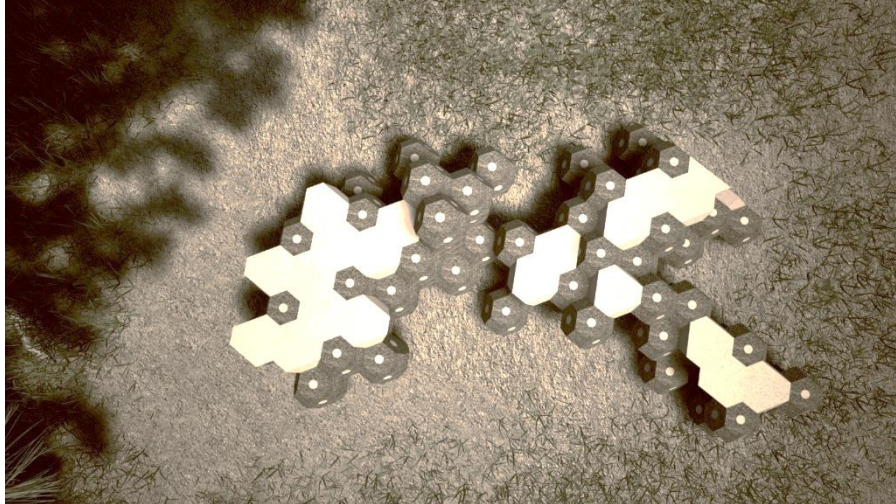
Particolarmente promettente risulta l'applicazione in contesti caratterizzati da tradizioni costruttive in terra cruda. Il sistema consente di reinterpretare tecniche costruttive tradizionali attraverso strumenti digitali contemporanei, generando una continuità culturale tra sapere costruttivo locale e innovazione tecnologica. L'utilizzo di terre locali, oltre a ridurre drasticamente l'impatto ambientale legato al trasporto dei materiali, permette di valorizzare risorse territoriali e competenze artigianali, inserendosi in logiche di economia circolare e sviluppo locale sostenibile.

La dimensione della personalizzazione formale costituisce un ulteriore ambito di sviluppo progettuale. La flessibilità del processo digitale consente la generazione di varianti formali site-specific, calibrate sulle caratteristiche morfologiche, culturali e funzionali del contesto di inserimento, mantenendo invariati i parametri di processo validati durante la sperimentazione prototipale.

Dal punto di vista sistemico, la possibilità di produrre on-site utilizzando terre locali riduce significativamente l'impatto logistico e ambientale. Le casseforme stampate in 3D possono essere trasportate facilmente, mentre il materiale principale viene reperito in loco, riducendo drasticamente il volume di materiali da trasportare e le emissioni associate. Questa caratteristica assume particolare rilevanza in contesti periferici, rurali o caratterizzati da difficoltà logistiche.

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*



**TAV.49-** Pianta e vista renderizzata- © Earth Beehive Bench | Progetto MICS 6.10

La reversibilità costruttiva costituisce un ulteriore vantaggio significativo. Gli elementi assemblati a secco possono essere smontati, riconfigurati e riassemblati secondo nuove logiche compositive, adattandosi all'evoluzione delle esigenze funzionali dello spazio pubblico. A fine vita, i conci in terra cruda possono essere disgregati e reimmessi in cicli produttivi successivi o restituiti all'ambiente senza generare rifiuti, configurando un modello di economia circolare coerente con i principi di sostenibilità ambientale.

La sperimentazione condotta con il prototipo Earth Beehive Bench dimostra quindi come la manifattura additiva indiretta applicata a materiali naturali non rappresenti semplicemente un'innovazione tecnica, ma costituisca un vero e proprio cambio di paradigma nella concezione, produzione e implementazione di sistemi di arredo urbano sostenibile. La convergenza tra controllo digitale della forma, utilizzo di materiali locali a basso impatto, modularità costruttiva e reversibilità d'uso delinea un orizzonte applicativo in cui la tecnologia digitale può contribuire significativamente alla qualificazione sostenibile degli spazi pubblici contemporanei, rispondendo simultaneamente a esigenze funzionali, estetiche e ambientali con soluzioni innovative e culturalmente radicate nel territorio.





**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

**PARTE TERZA**

**0.3**

**CONCLUSIONI**



### 3.1 Conclusioni e prospettive future

La ricerca ha esplorato l'Additive Manufacturing come paradigma progettuale e costruttivo capace di riorientare il rapporto tra forma, materia e processo in architettura. Attraverso un approccio sperimentale fondato sull'interazione tra modellazione parametrica, controllo robotico e comportamento dei materiali, il lavoro propone un processo progettuale che si sviluppa in stretta relazione con la fabbricazione, superando un'interpretazione dell'architettura digitale focalizzata esclusivamente sull'ottimizzazione formale.

I due dimostratori, Vasemode Bench ed Earth Beehive Bench, hanno permesso di confrontare strategie di manifattura additiva diretta e indiretta. La stampa diretta ha evidenziato coerenza tra continuità formale e processo additivo, mentre l'approccio indiretto ha integrato materiali naturali e pratiche tradizionali in un workflow digitale, aprendo a sistemi modulari, reversibili e potenzialmente circolari.

Pur non costituendo una validazione tecnologica completa né soluzioni immediatamente trasferibili alla scala edilizia, la ricerca definisce un quadro metodologico che integra progettazione computazionale, sperimentazione materica e fabbricazione additiva come parti di un unico processo. Il contributo principale risiede nella dimostrazione che le proprietà del materiale e i vincoli del processo possono guidare attivamente le scelte progettuali, rendendo l'architettura un processo adattivo e informato.



Alla pagina  
successiva:  
Fig.37

*Cassaforma di Earth  
Beehive Bench*

© Earth Beehive  
Bench. Progetto MICS  
6.10

Le prospettive future riguardano la validazione strutturale, la certificazione dei materiali, lo sviluppo di protocolli normativi e la valutazione ambientale su base quantitativa. Nel breve periodo, le applicazioni più realistiche riguardano componenti non strutturali e progetti sperimentali, mentre l'estensione alla scala edilizia richiede progressi tecnologici e istituzionali significativi.

In conclusione, l'Additive Manufacturing emerge non come una tecnologia risolutiva, ma come uno strumento critico per ripensare il progetto architettonico in relazione alle sfide ambientali, materiali e produttive contemporanee. La ricerca propone una visione dell'architettura come processo aperto e adattivo, in cui l'innovazione tecnologica non è fine a sé stessa, ma parte di una riflessione più ampia sulla sostenibilità, sulla reversibilità e sul ruolo del progetto nella trasformazione del costruito



Alla pagina  
successiva:

*Fig.38  
Modelli dimostrativi  
dei dimostratori  
esposti alla mostra  
Made in Italy Towards  
Sustainability. From  
Tradition to Futures,  
Palazzo Vecchio,  
Firenze.*

© Earth Beehive  
Bench e Vasemode  
Bench - Progetto  
MICS 6.10

**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*







## BIBLIOGRAFIA

### 00. INTRODUZIONE

Biennale di Venezia-Carlo Ratti:  
<https://www.labiennale.org/it/architettura/2025/intervento-di-carlo-ratti>

Politecnico di Bari, CONOSCENZA E INNOVAZIONE NEL PROGETTO PER IL PATRIMONIO  
<https://www.poliba.it/it/didattica/dottorati-di-ricerca/conoscenza-e-innovazione-nel-progetto-il-patrimonio-design-heritage>

European Commission. NextGenerationEU. [https://next-generation-eu.europa.eu/index\\_it](https://next-generation-eu.europa.eu/index_it)

Agenzia per la Coesione Territoriale, NextGenerationEU e PNRR.  
[https://www.agenziacoesione.gov.it/dossier\\_tematici/nextgenerationeu-e-pnrr/](https://www.agenziacoesione.gov.it/dossier_tematici/nextgenerationeu-e-pnrr/)

Governo Italiano. Le missioni e le componenti del PNRR.  
<https://www.governo.it/it/approfondimento/le-missioni-e-le-componenti-del-pnrr/16700>

Ministero dell'Università e della Ricerca. Dalla ricerca all'impresa.  
<https://www.mur.gov.it/it/pnrr/misure-e-componenti/dalla-ricerca-allimpresa>

Ministero dell'Università e della Ricerca, Investimento 1.3 - Partenariati estesi a Università, centri di ricerca, imprese e finanziamento progetti di ricerca.  
<https://www.mur.gov.it/it/pnrr/misure-e-componenti/m4c2/investimento-13-partenariati-estesi-universita-centri-di>

Ministero dell'Università e della Ricerca. (2022, August 3). PNRR-MUR: selezionati i 14 partenariati per attività di ricerca. <https://www.mur.gov.it/it/news/mercoledi-03082022/pnrr-mur-selezionati-i-14-partenariati-attivita-di-ricerca>

MICS. Spoke 6 - La manifattura additiva come fattore dirompente della Twin Transition. <https://www.mics.tech/spokes/spoke-6/>

MICS. Project 6.10 - The direct/indirect use of additive manufacturing in construction viscous mixtures. <https://www.mics.tech/projects/6-10-the-direct-indirect-use-of-additive-manufacturing-in-construction-viscous-mixtures/>

## **01. ADDITIVE MANUFACTURING NEL DESIGN E NELLE COSTRUZIONI**

Aghaei Meibodi, M., Voltl, C., & Craney, R. (2020). Additive thermoplastic formwork for freeform concrete columns. *ACADIA 2020: Distributed Proximities*, 1, 516–525.

Alves, J. (2016). RIBB3D: Sustainable ribbed slabs with 3D printed formwork. *Links*, 2960(2015), 660.

Asprone, D., Menna, C., Bos, F. P., Salet, T. A. M., Mata-Falcón, J., & Kaufmann, W. (2018). Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 112, 111–121.

Baranyk, I. (2017). This complex concrete column was made using 3D printed formwork. *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork>

Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225.

Bos, F. P., Ahmed, Z. Y., Jutinov, E. R., & Salet, T. A. M. (2017). Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete. *Materials*, 10(11), 1314.

Breseghello, L., Sanin, S., & Naboni, R. (2021, March). Toolpath simulation, design and manipulation in robotic 3D concrete printing. In *The 26th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2021* (pp. 623–632). CAADRIA.

Bruce, M., Clune, G., Xie, R., Mozaffari, S., & Adel, A. (2022). Cocoon: 3D printed clay formwork for concrete casting.

Byrson, Z. E., Srubar, W. V., Kawashima, S., & Ben-Alon, L. (2022, June). Towards 3D printed earth-and bio-based insulation materials: A case study on light straw

clay. In 18th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies.

Burger, J., Lloret-Fritschi, E., Scotto, F., Demoulin, T., Gebhard, L., Mata-Falcón, J., ... Flatt, R. J. (2020). Eggshell: Ultra-thin three-dimensional printed formwork for concrete structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 7(2), 48–59.

Buswell, R. A., Da Silva, W. L., Bos, F. P., Schipper, H. R., Lowke, D., Hack, N., & Roussel, N. (2020). A process classification framework for defining and describing digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 134, 106068.

Buswell, R. A., De Silva, W. L., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.

Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, 110–119.

Carneau, P., Mesnil, R., Roussel, N., & Baverel, O. (2020). Additive manufacturing of cantilever-From masonry to concrete 3D printing. *Automation in Construction*, 116, 103184.

Chaves Figueiredo, S., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2019). Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure. *Construction and Building Materials*, 212, 818–840.

Chen, M., Li, L., Zheng, Y., Zhao, P., Lu, L., & Cheng, X. (2018). Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulfoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 189, 601–611.

Chen, Y., Chaves Figueiredo, S., Yalçinkaya, Ç., Çopuroğlu, O., Veer, F., & Schlangen, E. (2019). The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing. *Materials*, 12(9), 1374.

Costa, E. C. E., Duarte, J. P., & Bártolo, P. (2017). A review of additive manufacturing for ceramic production. *Rapid Prototyping Journal*, 23(5), 954–963.

Darweesh, B., & Rael, R. (2024). Robotic Nubian Vault Construction. *Earth USA 2024*, 146–151.

Ding, T., Xiao, J., Zou, S., & Zhou, X. (2020). Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. *Composite Structures*, 254, 112808.

Doyle, S. E., & Hunt, E. L. (2019a). Dissolvable 3D printed formwork. *Ubiquity and Autonomy*.

Doyle, S. E., & Hunt, E. L. (2019b). Dissolvable 3D printed formwork exploring additive manufacturing for reinforced concrete. In *39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture: Ubiquity and Autonomy, ACADIA 2019* (pp. 178–187). ACADIA.

Duballet, R., Baverel, O., & Dirrenberger, J. (2017). Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*, 83, 247–258.

El-Sayegh, S., Romdhane, L., & Manjikian, S. (2020). A critical review of 3D printing in construction: Benefits, challenges, and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20, 1–25.

Fallacara, G., & Parisi, N. (2023). Additive manufacturing in architecture: 3D printing solutions for vaulted spaces. In *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021: Advances in Sustainable Construction Materials and Structures* (Vol. 40, p. 407).

Gardiner, J. B., & Janssen, S. R. (2014). FreeFab: Development of a construction-scale robotic formwork 3D printer. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 131–146).

Gaudillière, N., Duballet, R., Bouyssou, C., Mallet, A., Roux, P., Zakeri, M., & Dirrenberger, J. (2019). Large-scale additive manufacturing of ultra-high-performance concrete of integrated formwork for truss-shaped pillars. In

Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018 (pp. 459–472). Springer International Publishing.

Guamán-Rivera, R., Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Muñoz-Sanguinetti, C., González-Böhme, L. F., & Auat-Cheein, F. (2022). Recent developments and challenges of 3D-printed construction: A review of research fronts. *Buildings*, 12(2), 229.

Hambach, M., & Volkmer, D. (2017). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 79, 62–70.

Hambach, M., Rutzen, M., & Volkmer, D. (2019). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. In *3D Concrete Printing Technology* (pp. 73–113). Butterworth-Heinemann.

Huang, Z. (2022). 3D printed clay formwork for a functionally integrated wall construction.

Jipa, A. (2022). Free formwork: 3D printing for complex concrete architecture [Doctoral dissertation, ETH Zurich].

Jipa, A., & Dillenburger, B. (2022). 3D printed formwork for concrete: State-of-the-art, opportunities, challenges, and applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(2), 84–107.

Jipa, A., Barentin, C. C., Lydon, G., Rippmann, M., Chousou, G., Lomaglio, M., ... Dillenburger, B. (2019, October). 3D-printed formwork for integrated funicular concrete slabs. In *Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2019, No. 6, pp. 1–8)*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

Jipa, A., Giacomarra, F., Giesecke, R., Chousou, G., Pacher, M., Dillenburger, B., ... Leschok, M. (2019, June). 3D-printed formwork for bespoke concrete stairs: From computational design to digital fabrication. In *Proceedings of the 3rd Annual ACM Symposium on Computational Fabrication* (pp. 1–12).

Jipa, M. A., Aghaei Meibodi, M., Giesecke, R., Shammas, D., Leschok, M., Bernhard, M., & Dillenburger, B. (2018, November). 3D-printed formwork for

prefabricated concrete slabs. In 1st International Conference on 3D Construction Printing (3DcP). ETH Zurich, Digital Building Technologies (ITA).

Leder, S., Weber, R., Vasey, L., Yablonina, M., & Menges, A. (2020, September). Voxelcrete-Distributed voxelized adaptive formwork. In Proceedings of the 38th eCAADe Conference Anthropologic: Architecture and Fabrication in the Cognitive Age, Berlin, Germany (Vol. 2, pp. 433–442).

Leschok, M., & Dillenburger, B. (2019). Dissolvable 3DP formwork. In Ubiquity and Autonomy—Proceedings of ACADIA Conference. The University of Texas at Austin.

Leschok, M., & Dillenburger, B. (2020). Sustainable thin-shell 3D printed formwork for concrete. In Impact: Design with All Senses: Proceedings of the Design Modelling Symposium, Berlin 2019 (pp. 487–501). Springer International Publishing.

Meibodi, M. A., Odaglia, P., & Dillenburger, B. (2021). Min-max: Reusable 3D printed formwork for thin-shell concrete structures. In Projections-Proceedings of the 26th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA (Vol. 1, pp. 743–752).

Naboni, R., & Breseghello, L. (2018). Fused deposition modelling formworks for complex concrete constructions. In SIGraDi 2018, XXII Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics. Blucher.

Naboni, R., & Breseghello, L. (2019, October). Additive formwork for concrete shell constructions. In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2019, No. 6, pp. 1–8). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

Oesterle, S., Vansteenkiste, A., & Mirjan, A. (2012, June). Zero waste free-form formwork. In Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, ICFF (Vol. 30, p. 52). CICM and University of Bath, Dept. of Architecture and Civil Engineering.

Peters, B. (2014, October). Additive formwork: 3D printed flexible formwork. In ACADIA (Vol. 14, pp. 517–522).

Peters, B. P. (2015). U.S. Patent Application No. 14/718,144.

Sitnikov, V., Eigenraam, P., Papanastasis, P., & Wassermann-Fry, S. (2019). IceFormwork for cast HPFRC elements: Process-oriented design of a light-weight high-performance fiber-reinforced concrete (HPFRC) rain-screen façade. In The 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) (pp. 616–627).

## 02. APPLICAZIONI SPERIMENTALI DI NUOVE FORME

ArchDaily. (n.d.). IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia.  
<https://www.iaac.net>

Aureli, F., & Verdini, G. (2020). Additive manufacturing in earthen architecture: A review on rammed earth and 3D printing. *Journal of Building Engineering*, 32, 101711.

Ban, Y., & Li, Y. (2018). Design and construction of freeform rammed earth walls using digital formwork. *Automation in Construction*, 96, 399–411.

Bayram, A. K. Ş. (2021). Digital fabrication shift in architecture. In *Architectural Sciences and Technology* (pp. 173–193). Maltepe University Faculty of Education.

Bouayad, M., & Dakhil, F. (2017). Rammed earth construction: Material behavior and structural analysis. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 345–358.

Carbonara, A., Del Curatolo, F., Lops, M., & Tina, G. (2021). *Selfmade Architecture V* [Tesi di laurea magistrale non pubblicata]. Politecnico di Bari. Relatore: N. Parisi.

Carmo, M. (2013). *The digital turn in architecture 1992–2012*. Wiley.

Carmo, M. (2017). *The second digital turn: Design beyond intelligence*. The MIT Press.

Carpo, M. (2019). Particled: Computational discretism, or the rise of the digital discrete. *Architectural Design*, 89(2), 86–93. <https://doi.org/10.1002/ad.2416>

Checchia, G. (2017). Synthetic redundancy – An adaptive hi-res timber tectonic based on a digital material strategy [Master's thesis, Alma Mater Studiorum – University of Bologna]. [https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/14359/1/Tesi\\_GiovanniChecchia\\_upload.pdf](https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/14359/1/Tesi_GiovanniChecchia_upload.pdf)

Chiou, J., & Bierach, C. (2020, March 24). Openings in 3D printing with earth. IAAC Blog. IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia. <https://www.iaacblog.com/programs/openings-3d-printing-earth/>

Claypool, M. (n.d.). Our automa future – A discrete framework for the production of housing. In *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture* (pp. 46–53).

Claypool, M. (2021). Automation and the discrete: Exploring new potentials for streamlining production in architectural design research. *Journal of Architectural Education*, 75(1), 108–114. <https://doi.org/10.1080/10464883.2021.1859893>

IAAC – Assembled Architecture. (2023–2024). Students: Karali, P. F., Sawant, T., & Asiiwme, Y. Master in Advanced Architecture – IAAC.

Jiménez García, M. (2017). Discrete flexibility – Computing lightness in architecture. In *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture* (pp. 70–77).

Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K., & Yeh, Z. (2006). Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 301–320.

Khorranshahi, M. R., & Mokhtari, A. (2017). Automatic construction by Contour Crafting technology. *Italian Journal of Science & Engineering*, 1(1), 28–33.

Kim, D. (2017). WireVoxels [Portfolio]. The Bartlett School of Architecture, UCL. <https://issuu.com/donghwikim/docs/portfoliowirevoxel>

Kim, D. (2017). WireVoxels portfolio. The Bartlett School of Architecture, UCL. <https://issuu.com/donghwikim/docs/portfoliowirevoxel>

Koehler, D. (2017). Mereological thinking – Figuring realities within urban form. In *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture* (pp. 30–37).

Kovařík, D. (2018). Material moods: Materials and algorithms. *Architektúra & Urbanizmus*, 52(3–4), 240–251. <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=721999>

Liang, Y. (2017). Timblock portfolio [Portfolio]. The Bartlett School of Architecture, UCL. [https://issuu.com/yazhuliang/docs/5g\\_portfolio](https://issuu.com/yazhuliang/docs/5g_portfolio)

Liang, Y. (2017). Timblock portfolio. The Bartlett School of Architecture, UCL. [https://issuu.com/yazhuliang/docs/5g\\_portfolio](https://issuu.com/yazhuliang/docs/5g_portfolio)

Liu, J., Li, D., & Zhang, X. (2021). Automated rammed earth construction: From traditional methods to digital fabrication. *Construction and Building Materials*, 298, 123898.

Lops, M., & Parisi, N. (2024). Building with earth in Construction 4.0 era: Earth Bee-Hive, massive masonries using space-filling polyhedra. In *Proceedings of the VIPERC 3rd International Conference on Visual Pattern Extraction and Recognition for Cultural Heritage Understanding*. EDIFIR. ISBN 9788892802612

Lops, M., Parisi, N., Colapinto, D., & Graziano, A. V. (in press). Innovative digital fabrication approaches: Direct and indirect additive manufacturing in architecture. In *Advances in Science, Technology and Innovation (ASTI)*. Springer Nature.

Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., & Dillenburger, B. (2018). Particle bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 112, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>

Minke, G. (2012). *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture*. Basel: Birkhäuser.

Morel, P. (2019). The origins of discretism: Thinking unthinkable architecture. In *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture* (pp. 14–21). <https://doi.org/10.1002/ad.2407>

Parisi, N. (2023). New directions of 3D printed earth architecture. In Italian Workshop on Shell and Spatial Structures (pp. 559–568). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44328-2\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44328-2_58)

Parisi, N. (2024). Digital design for earthen construction: A new process for new shapes. In Proceedings of DARCH 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11078485>

Parisi, N. (2024). New paradigms for earth construction. In Proceedings of Earth USA 2024 Conference, Santa Fe, NM.

Pauson, J., & Kucera, P. (2019). Digital formwork for rammed earth: Towards robotic fabrication. In Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) (pp. 523–532).

Plethora Project. (n.d.). Plethora – parametric design and fabrication. <https://www.plethora-project.com>

Plethora Project – Jose Sanchez. (n.d.). <https://www.plethora-project.com>

Retsin, G. (2016). Discrete computational methods for robotic additive manufacturing: Combinatorial toolpaths. In CUMINCAD.

Retsin, G. (2017). Bits and pieces – Digital assemblies: From craft to automation. In Discrete: Reappraising the Digital in Architecture (pp. 38–45).

Retsin, G. (2019a). Discrete architecture in the age of automation. Architectural Design, 89(2), 6–13. <https://doi.org/10.1002/ad.2406>

Retsin, G. (2019b). Toward discrete architecture: Automation takes command. In ACADIA 2019.

Retsin, G. (2020). Discrete timber assembly. UCL Press.

Retsin, G., & Garcia, M. J. (2016). Discrete computational methods for robotic additive manufacturing: Combinatorial toolpaths. In CUMINCAD.

Retsin, G., Jiménez García, M., & Soler, V. (2017). Discrete computation for additive manufacturing. In Fabricate 2017 (pp. 178–183).

Rippmann, M., & Gramazio, F. (2015). Material-driven design: Rammed earth wall prototypes using digital fabrication. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2015* (pp. 56–69). Springer.

Rossi, A., & Tessmann, O. (2017). Aggregated structures: Approximating topology optimized material distribution with discrete building blocks. In *Proceedings of IASS Annual Symposia* (pp. 1–10).

Rossi, A., & Tessmann, O. (2019). From voxels to parts: Hierarchical discrete modeling for design and assembly. In *ICGG 2018 - Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics* (pp. 1001–1012). Springer.

Sambucci, M., Nouri, S. M., Lops, M., Graziano, A., Valente, M., Sarasini, F., Parisi, N., & Tirillò, J. (2025). Geomaterials for eco-efficient construction applications: Exploring Terra Rossa to design earth-based geopolymer mortar mixtures. In *Proceedings of the International Conference on Bio-Based Building Materials* (pp. 508–519). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-92874-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-031-92874-1_41)

Sambucci, M., Rizzo, A., Biblioteca, I., Tirillò, J., & Valente, M. (2024). Valorization pathway for metallurgical by-products of the Portovesme s.r.l. plant in cement-based materials formulation: Mechanical, technological behaviour and environmental analysis. In *Book of Abstracts of the XIV National INSTM Conference*.

Sanchez, J. (n.d.). Architecture for the commons – Participatory systems in the age of platforms. In *Discrete: Reappraising the Digital in Architecture* (pp. 22–29).

Sangiorgio, V., Parisi, F., Graziano, A. V., Tina, G., & Parisi, N. (2023). 3D-printing of viscous materials in construction: new design paradigm, from small components to entire structures. In *Architecture and Design for Industry 4.0: Theory and Practice* (pp. 521-537). Cham: Springer International Publishing.

Sheil, B., Skavara, M., Thomsen, M. R., & Ayres, P. (Eds.). (2024). *Fabricate 2024: Creating resourceful futures*. UCL Press.

Tessmann, O. (2012). Topological interlocking assemblies. In *Digital Physicality – Proceedings of eCAADe* (Vol. 1, pp. 211–219).

Tessmann, O., & Rossi, A. (2019). Geometry as interface: Parametric and combinatorial topological interlocking assemblies. *Journal of Applied Mechanics*, 86(11), 111002-1–111002-13. <https://doi.org/10.1115/1.4044606>

Theng, B., & Lehmann, K. (2016). The evolution of rammed earth construction: Historical techniques to 3D printing. *Journal of Architectural Conservation*, 22(1), 35–50.

ZamaniGoldeh, E., Dounas, T., & Agkathidis, A. (2025). Discretisation strategies in the architectural design process: A procedural classification system. *Architectural Science Review*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/00038628.2025.2458030>

Zhang, Y., & Wang, X. (2020). Optimization of rammed earth mixture for additive construction. *Materials*, 13(24), 5678.



**Mariangela Lops**

*L'uso diretto/indiretto dell'Additive Manufacturing per la progettazione e la costruzione architettonica*

## APPENDICE

### Disseminazione e Trasferimento del Know-how

La disseminazione dei risultati e il trasferimento del know-how costituiscono componenti strategiche e imprescindibili del progetto MICS, finalizzate a massimizzare l'impatto scientifico, culturale e socioeconomico delle attività di ricerca. In coerenza con quanto delineato nel *Piano di Disseminazione e Comunicazione*, tali azioni non si limitano a un processo di mera diffusione informativa, ma si configurano come strumenti attivi di costruzione di dialogo e partecipazione tra diversi attori: la comunità scientifica, il tessuto produttivo, il sistema educativo e il pubblico generale. L'obiettivo principale è quello di creare un ecosistema collaborativo che favorisca la circolazione delle conoscenze, la formazione di nuove competenze e il consolidamento di reti capaci di sostenere la competitività e l'innovazione nel quadro del Made in Italy.

In questa prospettiva, l'approccio alla disseminazione adottato dal progetto si è concentrato in particolare sull'organizzazione di workshop, seminari e programmi formativi, strumenti privilegiati per la condivisione e il trasferimento diretto del know-how maturato. Tali iniziative si pongono in alternativa alle forme tradizionali di comunicazione unidirezionale, prediligendo modalità partecipative e interattive che promuovano il confronto, la sperimentazione e la co-costruzione del sapere. L'attenzione alla dimensione esperienziale dell'apprendimento e alla creazione di comunità di pratica rappresenta, in questo senso, un tratto distintivo della metodologia di disseminazione del progetto. Il programma di attività si è articolato attraverso una pluralità di eventi diversificati per scala, destinatari e obiettivi, delineando una strategia di disseminazione multilivello.

- Summer School Self Made Architecture 7 – *Sharing past experiences*

La Summer School “*Sharing past experiences*” svoltasi presso l’Hawassa University Institute of Technology, ha rappresentato un’esperienza di sperimentazione architettonica che unisce tradizione costruttiva locale e innovazione tecnologica. Dieci studenti etiopi sono stati coinvolti in un laboratorio operativo centrato sulla ricerca materica e sulla sperimentazione diretta, attraverso la produzione di mattoni in terra cruda.

Sono stati sviluppati due impasti: il primo a base di terra argillosa, sabbia, acqua e fibre lunghe; il secondo con terra termitale, materiale tradizionale arricchito da sostanze organiche delle termiti, sabbia, acqua e fibre corte. In entrambi i casi è stata impiegata la corda di falso banana, risorsa locale di grande valore tecnico e simbolico. Il processo costruttivo, dalla preparazione delle fibre alla formatura dei conci in casseforme 3D stampate in PLA, ha mostrato un’interessante integrazione tra fabbricazione digitale e tecniche low-tech. La metodologia didattica “learning-by-doing” ha favorito l’apprendimento attraverso il fare, stimolando l’osservazione critica e la comprensione dei materiali.

L’esperienza ha promosso un trasferimento tecnologico bidirezionale, basato sul dialogo tra conoscenze locali e innovazioni globali. Essa suggerisce un modello di tecnologia appropriata, in cui la costruzione in terra cruda viene riattualizzata come pratica sostenibile, culturalmente radicata e tecnicamente evoluta, espressione di una modernità plurale capace di coniugare high-tech e tradizione.



Alla pagina  
successiva:

Fig.39

*Summer School Self  
Made Architecture 7 –  
Sharing past  
experiences*

© FabLab PoliBa



## Workshop Ambiente e territorio, moda e agricoltura – Fablab Tutorship e qualificazione imprese

Il Workshop “Ambiente e territorio, moda e agricoltura – FabLab Tutorship e qualificazione imprese”, svoltosi al FabLab Poliba dal 27 novembre al 6 dicembre 2024, ha rappresentato un’esperienza formativa rivolta a cento studenti di un istituto professionale di Sala Consilina. L’iniziativa ha promosso la contaminazione tra saperi artigianali e tecnologie digitali, affrontando i temi chiave del Made in Italy – moda, agricoltura, costruzioni e ambiente – attraverso un approccio operativo e partecipativo.

Particolarmente significativa è stata la sessione “Costruzioni e Ambiente”, durante la quale una parte degli studenti ha sperimentato l’architettura in terra cruda, producendo direttamente mattoni e analizzando le proprietà del materiale. Alla dimensione materica si è affiancata un’introduzione al design parametrico, con l’ottaedro come modulo generatore, favorendo il passaggio dal pensiero progettuale statico a quello algoritmico.

L’integrazione tra fabbricazione digitale e tecniche tradizionali ha offerto una prospettiva innovativa sulla sostenibilità e sulla progettazione modulare, stimolando la creatività e la comprensione dei processi costruttivi.

Oltre all’apprendimento tecnico, il workshop ha favorito il trasferimento di competenze e la creazione di reti territoriali, ponendo le basi per un modello formativo replicabile, capace di connettere università, scuole e imprese in un percorso di innovazione diffusa, sostenibile e radicata nelle realtà locali.



Alla *pagina*

successiva:

*Fig.10*

*Workshop Ambiente  
e territorio, moda e  
agricoltura*

© FabLab PoliBa



Particolare rilievo è stato inoltre attribuito alla formazione delle nuove generazioni e alla promozione delle discipline STEM, considerate strumenti centrali per garantire un futuro sostenibile al sistema dell'innovazione.

- **GenerAzioni**

L'evento *GenerAzioni*, ospitato dal *FabLab Poliba* il 6 luglio 2024, ha coinvolto dodici partecipanti in un percorso intergenerazionale che ha favorito lo scambio di competenze e la valorizzazione della memoria professionale in chiave tecnologica.

- **STEM Your Brain**

L'iniziativa *STEM Your Brain*, rivolta a cinquanta alunni della scuola primaria nel giugno 2024, ha avuto l'obiettivo di avvicinare i più piccoli al pensiero scientifico e alla logica della progettualità tecnologica, stimolando curiosità, creatività e senso critico. Tali attività testimoniano l'impegno del progetto nel costruire una cultura dell'innovazione che si radichi sin dalle prime fasi del percorso educativo.

- **PCTO Galileo**

Infine, il *PCTO Galileo*, sviluppato tra febbraio e marzo 2025 in collaborazione con un istituto superiore, ha rappresentato un esempio paradigmatico di integrazione tra ricerca, formazione e impresa. Coinvolgendo sessanta studenti in un percorso di alternanza scuola-lavoro presso il *FabLab Poliba*, l'esperienza ha permesso di coniugare conoscenze teoriche e applicazioni pratiche, favorendo l'acquisizione di competenze spendibili nel mercato del lavoro e rafforzando il legame tra scuola e territorio.



Alla pagina  
successiva:  
Fig.41

Vari Workshop e  
attività

© FabLab PoliBa



Nel complesso, le iniziative realizzate delineano un modello di disseminazione articolato e sistemico, capace di declinare la missione del progetto MICS in azioni concrete di impatto formativo, tecnologico e sociale. La varietà dei format e dei destinatari dimostra la capacità del progetto di adattarsi a contesti differenti mantenendo una coerenza metodologica basata sulla partecipazione attiva e sul trasferimento di saperi. In questa visione, la disseminazione non si configura come fase conclusiva della ricerca, bensì come parte integrante del processo di innovazione, strumento di costruzione collettiva di conoscenza e di valorizzazione dell'eccellenza italiana in ambito scientifico, culturale e produttivo.



