



Politecnico di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor / Graziano, A.V.. - ELETTRONICO. - (2025). [10.60576/poliba/iris/graziano-angelo-vito_phd2025]

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/285820> since: 2025-03-30

Published version

DOI:10.60576/poliba/iris/graziano-angelo-vito_phd2025

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU
Azione IV.4 "Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell'innovazione"
e Azione IV.5 "Dottorati su tematiche Green"

Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Dottorato di Ricerca in "Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio"
Dipartimento ArCoD – Politecnico di Bari

XXXVII Ciclo (2022 – 2023 – 2024)

Tutor: Prof. Nicola Parisi

Co-tutor: Prof. Giuseppe Fallacara





Department of Architecture, Construction and Design
**DESIGN FOR HERITAGE:
KNOWLEDGE AND INNOVATION**
Ph.D. Program
**SSD: CEAR-09/A–ARCHITECTURAL AND URBAN
DESIGN**
Final Dissertation

3D printed raw earth innovative shapes for urban design and outdoor comfort

by
Graziano Angelo Vito:

Referees:

Prof. Paolo Verducci

Prof. Valentino Sangiorgio

Supervisors:

Prof. Nicola Parisi

Prof. Giuseppe Fallacara

Coordinator of Ph.D. Program:
Prof. Carlo Moccia

Course n°37, 01/01/2022-31/01/2025

Dottorato di Ricerca in “Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio”
Dottorato di ricerca PON “Ricerca e Innovazione” 2014-2020 Azione IV.4
“Dottorati su tematiche dell’innovazione”
Curriculum: Costruzione
XXXVII Ciclo (2022-2025)

Politecnico di Bari
Via Orabona 4
70126 Bari, Italia

Dottorando: Angelo Vito Graziano
Matricola: 586883
Tutor: Prof. Nicola Parisi
Co-Tutor: Prof. Giuseppe Fallacara
Coordinatore del Dottorato: Prof. Carlo Moccia

INDICE

Introduzione		
Premessa		10
Campo d'indagine e finalità della ricerca		14
Struttura della tesi		20
SEZIONE 1: Posizionamento scientifico della ricerca		
1. Il materiale terra		26
1.1	Benefici, limitazioni, impatto sociale ed economico	26
1.2	Nuova vita di un materiale antico	32
2. Il viaggio della terra cruda: dall'autocostruzione all'industrializzazione		36
2.1	Il patrimonio vernacolare	36
2.2	Le antiche tecniche di costruzione in terra cruda	40
2.2.1	<i>Adobe</i>	44
2.2.2	<i>Pisè</i>	48
2.2.3	<i>Bouge</i>	52
2.2.4	<i>Torchis</i>	56
2.3	La moderna architettura in terra: Francois Cointeraux e Hassan Fathy	58
2.4	La terra cruda nell'architettura contemporanea	68
3. La Manifattura Additiva: nuova frontiera tecnica nel progetto e nella costruzione della architettura in terra cruda		108
3.1	La Manifattura Additiva come processo costruttivo	108
3.2	Material Extrusion in Architettura con terra cruda	116
3.2.1	<i>TerraPerforma</i>	118
3.2.2	<i>Gaia</i>	122
3.2.3	<i>Earth Wall</i>	126
3.2.4	<i>Tecla</i>	130
3.2.5	<i>Casa Covida</i>	134
3.2.6	<i>Tova</i>	138
3.2.7	<i>Dior pop-up store</i>	142
SEZIONE 2: Metodologia e campo di applicazione della ricerca		
4. Processi innovati: dalla progettazione informata alla realizzazione		150
4.1	L'autocostruzione digitale: le ricerche presso il FabLab Poliba	150
4.1.1	<i>Stereotomic Green Vault</i>	156
4.1.2	<i>Earth Beehive</i>	166
4.1.3	<i>Da Vinci's Bridge</i>	178
4.2	Il periodo di studio e ricerca in impresa presso Wasp s.r.l.	188
4.3	La relazione tra forma e tecnica costruttiva nella prospettiva tecnologica della stampa 3D	200

5. Campo applicativo: il benessere outdoor		204
5.1	Lo spazio urbano e la mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbano	204
SEZIONE 3: Risultati sperimentali della ricerca		
6. [In]formare la terra		212
6.1	Introduzione	212
6.2	Criteri compositivi	215
6.2.1	<i>Scala</i>	224
6.2.2	<i>Posizione</i>	234
6.2.3	<i>Altezza</i>	244
6.2.4	<i>Apertura della maglia muraria</i>	252
6.3	Permutazioni funzionali	262
7. Il dimostratore architettonico		270
7.1	Introduzione	270
7.2	La funzione del dimostratore	273
7.3	La generazione della forma	278
7.4	La struttura del dimostratore	280
7.5	La realizzazione	302
8. Considerazioni finali		318
Bibliografia		320

ABSTRACT

L'obiettivo della presente ricerca consiste nell'indagare le relazioni che intercorrono tra la tecnologia di manifattura additiva, alla scala dell'edificio, e la forma architettonica espressa dal sistema produttivo oltre ai materiali coinvolti nel processo e la funzione assunta dal manufatto. Il lavoro nella prima parte tratta dettagliatamente l'evoluzione delle tecniche utilizzate per le costruzioni in terra cruda. Questo excursus storico mira a validare il metodo additivo del *Material Extrusion* come nuova frontiera tecnica nel progetto e nella costruzione dell'architettura in terra cruda attraverso l'analisi di opere realizzate. La tesi prosegue prendendo in considerazione le metodologie progettuali e processuali necessarie per questa categoria di progetti affrontando criticamente il ruolo dell'architetto nell'era della progettazione computazionale e dei processi produttivi automatizzati nel settore edile. I risultati della ricerca si sostanziano in un modello che raccoglie alcuni criteri compositivi per consentire di operare nella progettazione di *shelter* urbani prodotti attraverso tecnologia additiva con l'uso di materiali naturali in contesti di spazio pubblico in area mediterranea. Infine, in linea allo sviluppo di analoghe ricerche scientifiche internazionali, è stato realizzato un dimostratore architettonico a scala reale, avvalendosi delle attrezzature che il Politecnico di Bari offre nei suoi laboratori. In questo contesto, il processo di definizione formale, le tecnologie di realizzazione e i materiali impiegati collaborano sinergicamente per migliorare le condizioni termo-igrometriche dell'ambiente contribuendo, allo stesso tempo, al benessere di chi ne fruisce.

The aim of the following research is to investigate the relationships between the Additive Manufacturing technology, at the scale of the building and: the architectural shape expressed by the production system; the materials involved in the process; the function taken by the product.

In the first part, the research gives a detailed analysis of the evolution in the techniques used for constructions made of raw earth. The historical excursus aims to validate the additive method of Material Extrusion as a new technical frontier in the design and construction made of raw earth architecture through the analysis of existing projects.

The thesis then moves on considering the design and process methodologies required for similar projects, analysing the role of the architect in the era of computational design and automated production processes in the construction industry. The results of the research lead to a model that brings together a set of compositional criteria for the design of urban shelters produced through additive technology and the use of natural materials in contexts such as the public space of Mediterranean cities.

Lastly, in line with similar international scientific research, a full-scale architectural demonstrator was realised, using the equipment that the Polytechnic of Bari provides in its laboratories. In this context, the form-finding process, the construction technologies and the materials used, work together synergistically to improve the thermo-hygrometric conditions of the environment while contributing to the well-being of those who use it.

INTRODUZIONE

PREMESSA

Come diventare moderni e tornare alle fonti; come far rivivere una vecchia civiltà dormiente e prendere parte alla civiltà universale¹.

Le parole di Ricoeur sintetizzano l'atteggiamento di questa ricerca, che esplora le potenzialità della stampa 3D nel settore edile architettonico utilizzando materiali naturali come la terra cruda.

La ricerca si inserisce nel XXXVII ciclo del dottorato in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio, Curriculum Costruzione, presso il Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD) del Politecnico di Bari². Il corso mira a comprendere, valorizzare e conservare il patrimonio architettonico e paesaggistico, proponendo anche una sua attualizzazione. La presente ricerca indaga la relazione tra forma architettonica e tecnologia produttiva additiva, nuova frontiera tecnica nel campo edile. Il patrimonio analizzato è di natura immateriale e riguarda le tecniche di costruzione in terra cruda, tecniche antiche che prevedevano la realizzazione di manufatti architettonici seguendo specifiche pratiche auto costruttive attraverso l'impiego di risorse e materiali locali perseguendo una sostenibilità ambientale ante litteram. Queste tecniche possono essere attualizzate con tecnologie digitali capaci di utilizzare materiali naturali in nuovi processi costruttivi.

La presente ricerca è finanziata dal Programma Operativo Nazionale PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020³. In particolare, l'azione IV.4 del Programma – Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell'innovazione – mira a promuovere l'attività di ricerca sui temi dell'innovazione, del digitale e delle tecnologie abilitanti sostenendo, al contempo, la valorizzazione del capitale umano, quale fattore determinante per lo sviluppo della ricerca e dell'innovazione in Italia⁴. A tale scopo il finanziamento ha promosso la collaborazione tra ricerca universitaria e mon-

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

do economico produttivo introducendo lo svolgimento di un periodo di studio e ricerca presso l'impresa italiana WASP s.r.l. (arconimo di *World's Advanced Saving Project*) azienda specializzata nella produzione di stampanti 3D per molteplici settori manifatturieri, e che ha l'obiettivo più generale di innovare il settore edilizio con le tecnologie additive.

La stampa 3D, quale processo di fabbricazione additiva, rappresenta uno dei principi produttivi cardine nella quarta Rivoluzione Industriale, denominata "Industria 4.0". Le organizzazioni nazionali e transnazionali hanno stanziato significativi finanziamenti per promuovere e incentivare l'adozione di processi di automazione, tra cui la stampa 3D, nei settori produttivi. In Italia, il Piano Nazionale Transizione 4.0, evoluzione del precedente piano Industria 4.0, rappresenta uno strumento cruciale, offrendo crediti d'imposta per l'acquisto di beni strumentali innovativi e tecnologie digitali. Parallelamente, iniziative come la Nuova Sabatini sostengono le PMI (Piccole e Medie Imprese) con contributi per l'acquisto di macchinari avanzati, incentivando l'uso di soluzioni additive e automatizzate. A livello europeo, programmi come *Horizon Europe* e il *Digital Europe Programme* finanziano progetti di ricerca, sviluppo e implementazione delle tecnologie additive, favorendo la competitività delle imprese nel contesto globale. Il *Green Deal* Europeo, inoltre, promuove l'uso della stampa 3D come strumento per migliorare la sostenibilità dei processi produttivi, riducendo gli sprechi e il consumo di risorse.

Se si pensa alle parole dell'allora presidente degli Stati Uniti Barack Obama nel Discorso sullo Stato dell'Unione del febbraio 2013 comprendiamo come questa tecnologia sia stata eletta a simbolo di una nuova stagione per le politiche occidentali in ragione del contrasto alla globalizzazione, dell'incentivo alla rinazionalizzazione della produzione manifatturiera e alla creazione di nuovi posti di lavoro.

Ci sono cose che possiamo fare, in questo momento, per accelerare questa tendenza (rinazionalizzare la produzione). L'anno scorso abbiamo creato il nostro primo laboratorio di produzione innovativa a Youngstown, Ohio. Un vecchio magazzino è stato trasformato in un laboratorio in cui si lavora alla stampa 3D, che ha il potenziale per rivoluzionare il nostro modo di fare quasi tutto. La stessa cosa può accadere in altre città. Così stasera annuncio l'apertura di altri tre centri di produzione, in cui le imprese collaboreranno con i Dipartimenti della Difesa e dell'Energia per trasformare territori lasciati indietro dalla globalizzazione in centri mondiali per creare posti di lavoro high-tech. E chiedo aiuto a questo Congresso per realizzare una rete di quindici hub e garantire che la prossima rivoluzione nella produzione sia Made in America.

L'attenzione nei confronti della stampa 3D ha, ormai da un ventennio, investito anche il settore edile, dapprima attraverso un approccio accademico e di ricerca scientifica ed oggi nella pratica di cantiere. Il settore è l'ultimo ad adottare tale innovazione date le sue peculiarità socioeconomiche e tecniche. Infatti, nonostante l'edilizia rappresenti una delle principali fonti di sviluppo economico e occupazione globale, la filiera si distingue per una produttività stagnante e un'obsoleta pratica applicativa che punta soprattutto nell'utilizzo della manodopera diretta manifestando un rallentamento nell'introduzione delle innovazioni. Nonostante ciò, la dimensione del mercato globale delle costruzioni in stampa 3D è stata stimata in 53,9 milioni di dollari nel 2024 e si prevede che raggiungerà i 99,3 milioni di dollari nel 2025 con un tasso di crescita annuo composto del 111,3% dal 2025 al 2030 per raggiungere i 4,18 miliardi di dollari entro il 2030⁵.

Nella presente ricerca saranno chiariti le numerose differenze tecniche riguardo i vari processi di stampa che nel settore edile sono identificati con la dicitura C3DP (*Construction 3D Printing*) tra cui emergono applicazioni con polveri metalliche,

materiali plastici, materiali cementizi e materiali compositi. Al momento preme sottolineare come il segmento riguardante il processo dell'estrusione ha dominato il mercato con una quota di fatturato di oltre il 62.0% nel 2024 e che il materiale più utilizzato è il calcestruzzo con una quota del fatturato del 34,8% nel 2024. *ibidem*

Tra i principali attori di mercato si menzionano:

COBOD; XtreeE; Apis Cor; WASP; CyBe Construction; MX3D; Contour Crafting Corporation e ICON.

Essi offrono la realizzazione di tre tipi principali di elementi: manufatti fabbricati off-site per il montaggio discreto in cantiere, casseforme stampabili sia in loco che in laboratorio e, infine, edifici monolitici che vengono realizzati in situ.

CAMPO D'INDAGINE E FINALITA' DELLA RICERCA

Una così emergente innovazione tecnologica per il settore apre interessanti campi d'indagine affrontati nel lavoro di ricerca: il livello di prontezza tecnologica⁶ della stampa 3D nel settore edilizio; il ruolo della professione dell'architetto e della disciplina architettonica nell'era della transizione digitale e automazione dei processi; gli aspetti ambientali e le ricadute sociali ed economiche.

Le sfide nelle costruzioni civili in stampa 3D oggi coinvolgono un'ampia gamma di fattori: la scala, la stampabilità del materiale, le performance del materiale (mutevoli all'evolversi del processo di stampa), le limitazioni normative solo per citarne alcune. Nonostante la stampa 3D in architettura abbia a che fare con l'automazione non è affatto automatica; probabilmente, il ruolo della stampa 3D non è necessariamente quello di sostituire completamente il lavoro umano, ma di migliorare e ottimizzare vari aspetti dei processi ad alta intensità di lavoro. Quindi appare necessario pensare un'integrazione della costruzione manuale con quella automatizzata. Questo aspetto pone il settore di fronte a nuove e interessanti sfide di compatibilità nei cantieri attuali riguardo le procedure di sicurezza e alfabetizzazione digitale della forza lavoro. Per superare questi problemi è necessaria una collaborazione tra il settore pubblico e quello privato per migliorare le capacità di formazione e investimento.

Specificando la discussione nell'ambito della disciplina del progetto di architettura, emergono aspetti di particolare interesse come l'influenza sul linguaggio progettuale e sul lavoro dell'architetto in riferimento a nuove relazioni tra materiali, sito e produzione. Se pensiamo che l'avanzamento tecnologico più significativo nell'edilizia moderna, ovvero l'adozione del calcestruzzo, sia stato accompagnato da decenni di dibattiti tra architetti e ingegneri su quale fosse il linguaggio formale di un materiale che, fissandosi in uno stampo, può assumere

qualsiasi forma; è opportuno adesso interrogarsi su quale sia il linguaggio prodotto da una nuova tecnologia come la stampa 3D. Una componente stampata in 3D in architettura non è solo la trasformazione del modello digitale in una controparte fisico, ma anche l'architettura della stampa, intesa come processo. Tali aspetti sollevano rilevanti interrogativi rispetto a cosa significhi progettare una stampa e come questo aspetto si integri nella disciplina architettonica. Se i progressi tecnologici in diverse epoche e culture hanno influenzano l'architettura, può valere lo stesso per la stampa 3D? Questo può essere considerato un tema di indagine primaria per la disciplina architettonica. A livello internazionale sono pochi gli istituti di ricerca che indagano tale aspetto. Tra i più importanti si annovera l'Istituto di Architettura Avanzata di Catalogna IAAC, l'Istituto di Progettazione Computazionale di Stoccarda ICD, l'ETH di Zurigo e chiaramente l'MIT di Boston. Al Politecnico di Bari, i lavori del Prof. Arch. Giuseppe Fallacara e del Prof. Arch. Nicola Parisi, direttore del FabLab Poliba – centro di fabbricazione digitale del Politecnico di Bari -, hanno portato tali tematiche all'interno della didattica della disciplina oltre che nelle personali ricerche scientifiche.

Effettivamente la stampa 3D apre nuove possibilità progettuali permettendo un costante controllo nella fase produttiva del manufatto da realizzare attraverso un'automata corrispondenza tra progettazione e realizzazione. Per esaltare queste potenzialità la manifattura additiva in architettura è utilizzata maggiormente per la realizzazione di forme complesse. Tale aspetto a volte distoglie l'attenzione dal tema più interessante dal punto di vista espressivo formale: controllare la realizzazione di una forma coerentemente con il suo processo costruttivo. L'introduzione delle tecnologie digitali ha trasformato radicalmente la progettazione architettonica influenzando non solo la fase concettuale, ma anche quella realizzativa. L'adozione del CAD (*Computer Aided Design*) ha modificato il tradizionale processo progettuale permettendo una più efficiente ed effi-

cace gestione del progetto architettonico attraverso modelli virtuali avanzati con informazioni dettagliate sul comportamento dell'edificio prima della sua realizzazione. In tal senso, il BIM (*Building Information Modeling*) rappresenta l'espressione massima di questo approccio in cui tutte le informazioni su di un edificio sono integrate su modelli digitali tridimensionali in modo da favorire una più chiara collaborazione tra i diversi attori del progetto, migliorando la precisione, l'efficienza e la sostenibilità di ogni fase di vita dell'opera: dalla progettazione alla realizzazione, fino alla gestione e alla manutenzione dell'edificio. Le potenzialità del CAD sono ora implementate con il CAM (*Computer Aided Manufacturing*) anche nel settore edilizio, che guida la realizzazione fisica dei progetti tramite la definizione dei parametri di produzione. La logica conseguenza è l'applicazione del digitale alla fase costruttiva: la *digital fabrication*. Il progresso delle tecnologie di fabbricazione, sempre più legate al controllo numerico (identificato con la sigla CNC), parallelamente al declino delle pratiche artigianali tradizionali nel settore edile, richiede e dà origine a nuove figure professionali, capaci di assumere la responsabilità complessiva delle trasformazioni attraverso il progetto, includendo la gestione del processo costruttivo, sempre più automatizzato e governato da macchine. In tal modo, il settore delle costruzioni sta progressivamente perdendo le figure tradizionali legate alla gestione manuale del cantiere, mentre sta acquisendo nuovi metodi e processi costruttivi basati sul controllo numerico. Il lavoro degli architetti muta quindi da una pratica allografica a una autografica, ossia dalla semplice progettazione alla realizzazione diretta⁷. Infatti, la produzione da parte degli architetti di informazioni 2D, ovvero un'insiemi di istruzioni per la costruzione di un edificio (da parte di altri), viene gradualmente sostituita da dati digitali 3D che vengono direttamente prodotti in strutture fisiche senza la necessità di tradurre le informazioni. Il già citato *Green Deal* Europeo descrive la strategia che l'organismo sovranazionale assume. Sul sito della Commissione

Europea si legge:

è la nuova strategia dell'UE per la crescita che mira a trasformare l'Unione in una società giusta e prospera, dotata di un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva, che a partire dal 2050 non genererà più emissioni nette di gas a effetto serra. L'obiettivo principale è sfruttare il notevole potenziale dei mercati globali in termini di tecnologie a basse emissioni e prodotti e servizi sostenibili al fine di conseguire la neutralità climatica entro il 2050.

Si amplia quindi il nostro campo d'indagine con la capacità di coniugare innovazione tecnologica, attraverso l'utilizzo della fabbricazione additiva, e impiego di materiali sostenibili. Materiali come la terra cruda, il fango, l'argilla rappresentano risorse fondamentali per la civiltà contemporanea. Già oltre 10.000 anni fa le città venivano costruite con mattoni di fango crudo, e oggi l'uso dell'adobe, terra battuta, graticcio e fango è ancora presente nell'edilizia. La costruzione in terra offre un potenziale significativo per un'architettura sostenibile: essendo un materiale abbondante e disponibile globalmente, può essere utilizzata direttamente sul luogo di estrazione o nelle vicinanze, riducendo i costi di trasporto. Richiede una lavorazione industriale minima o addirittura nulla; è completamente riciclabile se non vi sono aggiunte di altri materiali industriali, e garantisce comfort termico, mantenendo freschi gli ambienti in presenza di temperature elevate e caldi in condizioni fredde. Inoltre, poiché è disponibile quasi ovunque nel mondo, è un materiale economico, se non addirittura gratuito. Nei tempi recenti, spinti dalle esigenze del costruire sostenibile, l'evoluzione chimico fisica del materiale, tradizionalmente limitato da fragilità e scarsa resistenza, è guidata da avanzamenti tecnologici che mirano a potenziarne l'affidabilità. Le finalità della ricerca risiedono quindi nelle molteplici relazioni che la tecnologia di manifattura additiva assume in rela-

zione alla forma, al materiale e alla funzione di ciò che riescono a creare.

In prima istanza, il rapporto tra tecnica e forma parte dal documentare le potenzialità che il processo di stampa 3D può conferire al manufatto creato: l'addizione di strati uno sull'altro crea una caratteristica texture superficiale testimonianza di coerenza costruttiva; la viscosità del materiale consente un limitato angolo di sbalzo e così via arrivando a definire quali sono le forme possibili attraverso questo processo. Non solo, la tecnologia è concepita come manifestazione del design computazionale secondo una narrazione della logica evoluzione degli strumenti progettuali nell'era digitale. La stampa 3D di qualsiasi geometria è direttamente collegata all'informazione digitale. La geometria digitale può essere generata utilizzando un algoritmo o una formula matematica; può essere modellata e formata manualmente utilizzando un software digitale o addirittura partire da una scansione 3D.

L'introduzione di nuovi processi di realizzazione degli edifici e l'adozione di nuovi materiali nell'industria delle costruzioni procedono lentamente. Il rapporto tra tecnica e materiale è da intendersi nella possibilità di riattualizzare la costruzione con materiali naturali come la terra cruda. Tale aspetto fa riferimento ad un senso più ampio di sostenibilità che comprende temi come la bioclimatica, impiego appropriato di materiali e tecnologie, attenzione ai principi (pur in continuo rinnovamento) dell'identità architettonica e materiale dei luoghi, appropriata implementazione di nuove modalità di progettazione e fabbricazione. Ciò in contrasto con quello che è oggi sembra essere la tendenza ovvero giustificare qualsiasi edificio, costruito in qualsiasi modo, in virtù del fatto che esso produce più energia di quanto ne consuma, concentrandosi esclusivamente sulla sostenibilità energetica e non sull'impronta climatica che l'adozione di determinati materiali, la loro lavorazione e il trasporto comportano.

La presente indagine sul rapporto tra tecnica e funzione si

concretizza nella contestualizzazione di un approccio basato sull'utilizzo della tecnologia additiva e sull'uso di materiali sostenibili come la terra cruda adottando come tema applicativo un contesto specifico come quello dello spazio aperto delle città mediterranee.

La sintesi dei risultati ottenuti è stata la realizzazione di un dimostratore architettonico a scala reale realizzato in manifattura additiva con un materiale a base di terra cruda. Il ruolo del prototipo è stato quello di validare gli approcci descritti e codificati nel lavoro di tesi. Il risultato è un modello utile alla progettazione di murature urbane installabili in ambiente outdoor la cui definizione formale avviene in relazione a parametri performativi assunti come input generativi. Questo metodo sperimentale di condurre la ricerca sino alla realizzazione effettiva di un manufatto è in linea con le migliori pratiche delle tesi di ricerca internazionali e che da qualche anno caratterizza le analoghe ricerche di dottorato condotte presso il Politecnico di Bari.

STRUTTURA DELLA TESI

La presente tesi è articolata in tre sezioni e otto capitoli. La prima sezione delinea il posizionamento scientifico della ricerca in cui è delineata una panoramica dell'evoluzione storica delle tecniche costruttive in terra cruda che spazia dal patrimonio vernacolare alle antiche tecniche di costruzione fino alle opere di François Cointeraux, Hassan Fathy e alle architetture contemporanee realizzate con questo materiale. Infine, la sezione descrive la stampa 3D nel settore edile con un focus sulla tecnologia del *Material Extrusion*, presentata come una tecnica capace di attualizzare la costruzione in terra cruda.

Nella seconda sezione viene esplicitata la metodologia di ricerca e il suo campo di applicazione. Questa sezione raccoglie le esperienze maturate durante il periodo di studio e ricerca presso l'azienda italiana WASP, detentrici del brevetto di una tipologia di tecnica di stampa 3D in grado di estrarre materiali viscosi (cemento, malta a base di terra cruda e argilla) attraverso il processo additivo denominata LDM (*Liquid Deposition Modeling*). Inoltre, sono presentate le esperienze pratiche svolte durante il dottorato all'interno del FabLab Poliba, laboratorio di fabbricazione digitale del Politecnico di Bari. Tali esperienze, tra cui la realizzazione del prototipo *Stereotomic Green Vault*, il prototipo *Earth Beehive* e il ponte *Da Vinci's Bridge*, sono esaminate per indagare la relazione tra forma e tecnica costruttiva. Un elemento comune a queste esperienze è la metodologia auto costruttiva per la realizzazione dei manufatti, che consente di parlare di autocostruzione digitale, evidenziando come il ruolo dell'architetto e del progettista nell'era della *digital fabrication* si completi con una nuova responsabilità: quella della processualità costruttiva, sempre più governata dalle macchine. È interessante notare come si crei un ponte tra le tecniche antiche di autocostruzione in terra cruda e la nuova concezione di autocostruzione nell'era digitale, entrambe caratterizzate dalla riduzione della distanza tra progettista e co-

struttore. Questa sezione presenta inoltre il campo applicativo della ricerca, focalizzandosi sullo spazio urbano mediterraneo, le sue funzioni, la versatilità e come possa essere utilizzato per il contrasto al fenomeno delle isole di calore urbano generando benessere per la collettività.

Nella terza sezione vengono esposti i risultati sperimentali della ricerca. È stato elaborato un modello capace di adattarsi a diverse esigenze della vita urbana, migliorandone le condizioni di benessere attraverso principi di raffrescamento passivo, supportati da una progettazione informata a base algoritmica che integra i dati ambientali dei luoghi nel processo di definizione formale. Sono presentate varianti compositive di tale modello e, infine, viene descritto un dimostratore realizzato a scala reale, la cui definizione formale è il risultato della volontà di testare gli aspetti tecnici, fisici e compositivi.

Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Note

1 P. Ricoeur, *History and Truth*, Northwestern University Press, Evanston, 1965.

2 Il dottorato si articola in tre curriculum: Patrimonio Storico, focalizzato su tematiche legate al restauro, alla conservazione e al riuso di beni architettonici, archeologici, paesaggistici e naturali; Città e Territorio, rivolto a studi alla scala urbana; e Costruzione che riguarda l'approfondimento del rapporto tra progettazione, forma e struttura.

3 Con Decreto Ministeriale 10 agosto 2021, n. 1061, sono state assegnate nuove risorse FSE REACT-EU per percorsi di dottorato di ricerca attivi e accreditati nell'ambito del XXXVII ciclo e per programmi di dottorato nazionale. Il decreto prevede l'assegnazione di oltre 50 milioni di euro per dottorati di ricerca su tematiche dell'innovazione e di 180 milioni di euro da destinare a dottorati su tematiche green

4 Fonte: Dottorati su tematiche dell'innovazione e green: nuove risorse dal PON Ricerca e Innovazione www.ponricerca.gov.it

5 Fonte: 3D Printing Construction Market Size, Share & Trends Analysis Report By Method, By Material Type (Concrete, Composite), By End-use (Building, Infrastructure), By Region, And Segment Forecasts, 2025 - 2030. www.grandviewresearch.com

6 Il *Technology Readiness Level* (TRL) è uno dei metodi più comuni per valutare l'avanzamento di una tecnologia. È una scala numerata da 1 a 9 che descrive lo stadio di maturità della tecnologia:

TRL 1-3: Sperimentazione di base e studi teorici (concetto e ricerca iniziale).

TRL 4-5: Prototipi di laboratorio e prove preliminari in ambiente controllato.

TRL 6-7: Prototipi dimostrati in ambiente realistico o operativo (scala pilota).

TRL 8-9: Sistema completato e qualificato (implementazione a piena scala).

Questo metodo permette di capire a che punto del percorso di sviluppo si trova una tecnologia, se è ancora in fase sperimentale o se è pronta per un'applicazione commerciale.

Attualmente, la tecnologia di stampa 3D per l'edilizia si trova a livelli di TRL variabili tra TRL 6 e TRL 8, a seconda delle applicazioni specifiche.

7 La definizione citata è quella di architettura come allografia, cioè come *“un'arte i cui edifici sono istanze dell'autorialità dell'artista senza essere da lui direttamente realizzati”* (Aureli, 2011). Nell'autografia, che può essere considerata l'opposto dell'allografia, gli edifici sono realizzati direttamente dall'architetto.

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON “Ricerca e Innovazione” 2014-2020 Azione IV.4

“Dottorati su tematiche dell'innovazione”



SEZIONE 1

Posizionamento scientifico della ricerca

1 IL MATERIALE TERRA

1.1 BENEFICI, LIMITAZIONI, IMPATTO SOCIALE ED ECONOMICO

La terra cruda emerge come una soluzione alternativa più sostenibile ed ecologica nel panorama edilizio moderno. Questo materiale naturale è oggi riconosciuto come una scelta eco-compatibile rispetto ai tradizionali materiali da costruzione ad alto impatto ambientale. L'utilizzo della terra nel settore edile offre vantaggi ambientali e tecnici con significativi risvolti socioeconomici.

La terra è un materiale naturale, ecologico, rinnovabile e diffuso. Derivato dall'erosione naturale della roccia madre, la terra cruda si arricchisce di minerali grazie all'azione dei corsi d'acqua e del vento acquisendo una composizione differente a seconda del contesto geografico. In edilizia è diffuso l'utilizzo di strati minerali, composti da argilla, sabbia, limo e ghiaia, al di sotto del terreno vegetale. Ulteriore vantaggio è la varietà di colori e texture che, a seconda del sito d'estrazione, la terra offre, consentendo una perfetta integrazione degli edifici nel paesaggio locale e contribuendo ad incrementare la ricchezza del patrimonio architettonico del luogo. La terra è facilmente estraibile e può essere combinata con altri materiali naturali come paglia, canapa o lino, migliorando le proprietà meccaniche e isolanti senza comprometterne la biocompatibilità; non necessita di trattamenti chimici e, al termine del ciclo vitale, può essere restituita alla natura senza danni ambientali. Il 74% della crosta terrestre è costituita da argille e lateriti adatte alla costruzione questo dato sottolinea come la terra sia una risorsa facilmente reperibile e non soggetta a fluttuazioni di mercato o monopoli commerciali poiché il suo impiego implica bassi costi di acquisto, trasporto e lavorazione.

Resistenza, durevolezza, riparabilità, riciclabilità e adattamento al clima umido sono le principali caratteristiche della terra cruda. Occorre sottolineare che l'adattabilità al clima umido è possibile se durante la progettazione dell'edificio vengono im-

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

piegati alcuni accorgimenti tecnici come, ad esempio, basamenti impermeabili e coperture sporgenti, le strutture in terra possono resistere a carichi e pressioni senza deformarsi o rompersi facilmente grazie alla combinazione di frizione e coesione tra le particelle di terra, che garantiscono stabilità e sicurezza. Numerosi edifici in terra cruda, come la città di Shibam nello Yemen e i palazzi di Lione in Francia, testimoniano la durabilità di questo materiale. La terra risulta essere facilmente riparabile in quanto le lesioni causate dal tempo sui muri possono essere riparate con la stessa miscela utilizzata al principio del cantiere senza lasciare tracce visibili.

Oltre a una notevole bellezza visiva, i muri in terra presentano eccellenti proprietà termo-igrometriche. La loro capacità di regolare l'umidità, di accumulare e rilasciare calore in modo equilibrato e progressivo assicura un comfort abitativo ideale. Gli ambienti si presentano freschi in estate e caldi in inverno. La porosità, invece, migliora l'isolamento acustico assorbendo e attutendo i rumori esterni e interni offrendo un'atmosfera tranquilla.

L'uso della terra cruda promuove un'economia circolare, valorizzando le risorse locali e creando nuove opportunità di occupazione a livello territoriale. Questo materiale è facilmente accessibile e riduce i costi di costruzione e manutenzione favorendo anche l'accessibilità abitativa. Le tecniche tradizionali da costruzione in terra cruda stimolano la trasmissione di competenze artigianali arricchendo il patrimonio culturale della comunità. Se analizziamo la terra cruda in ambito sociale, il suo impiego permette di sovvertire i modelli economici tradizionali favorendo l'autosufficienza, la cooperazione e l'autonomia nella produzione dei materiali. I cantieri che utilizzano la terra come materiale principale incoraggiano l'occupazione locale e le piccole e medie imprese coinvolte nella costruzione, rendendo l'atto del costruire un'esperienza solidale e partecipativa.

La bassa energia grigia associata al suo ciclo vitale dimostra

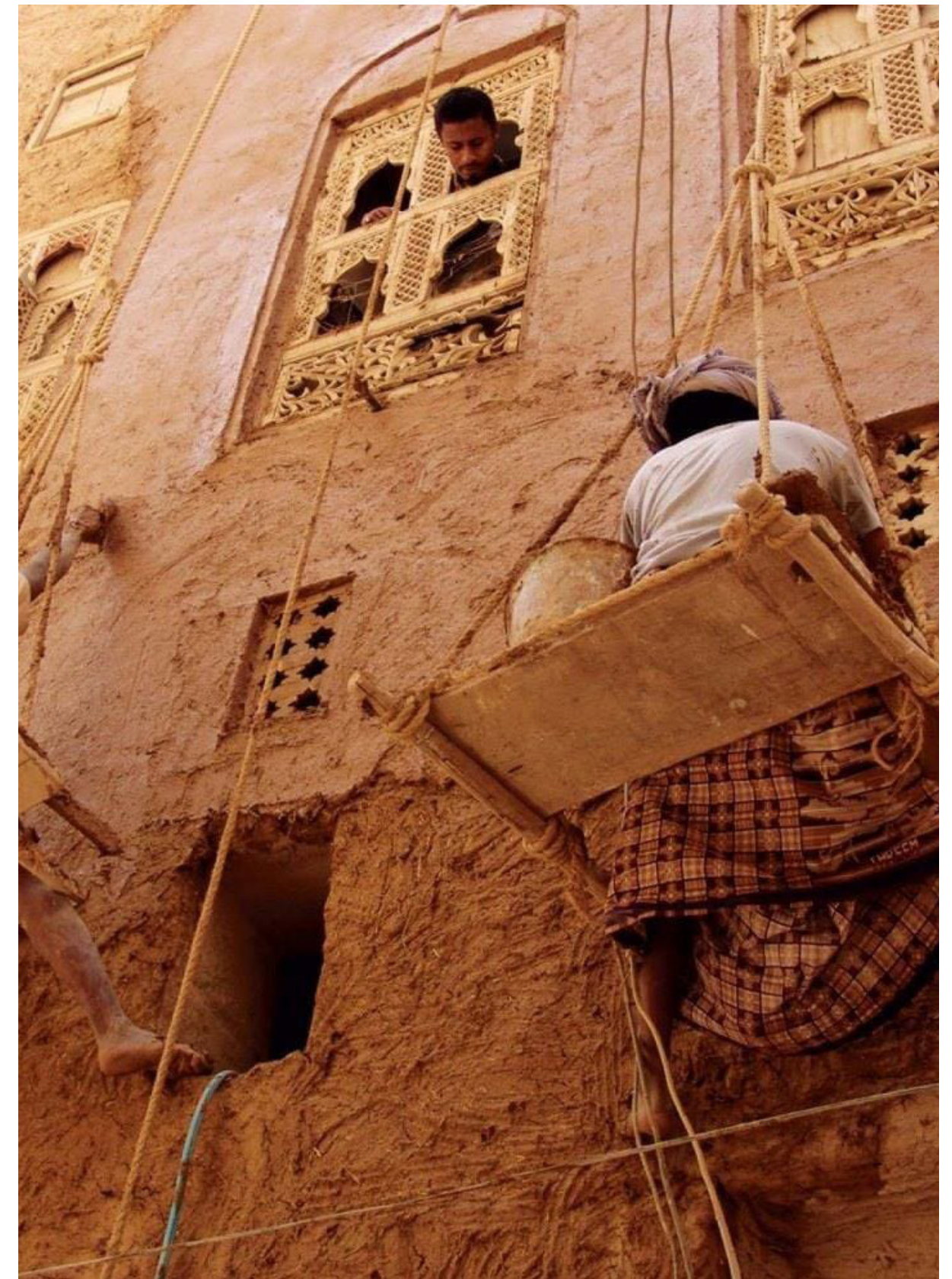
come la terra non sia un materiale energivoro. La sua estrazione e trasformazione richiedono poca energia, specialmente se il materiale viene prelevato direttamente dal sito di costruzione, così da abbattere i costi relativi allo stoccaggio e al trasporto. Le emissioni di anidride carbonica sono estremamente basse e contribuiscono ad ottenere un'edilizia più ecologica e sostenibile.

Sebbene la terra cruda offra numerosi vantaggi, presenta alcune limitazioni. I muri di terra necessitano di una base solida, spesso in calcestruzzo, mattoni o pietra, per prevenire l'azione capillare. Per le strutture di grandi dimensioni è necessario integrare la terra a materiali come legno, calcestruzzo o ferro. Le normative edilizie, in alcuni casi, risultano inadeguate o troppo rigide limitandone l'adozione come materiale da costruzione.

Alla pagina successiva: ►►

Operazioni di manutenzione in un palazzo nella città di Shibam nello Yemen

© <https://pragmatika.media/it/news/manhjetten-pustyni-pod-ugrozoj/>



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Città di Babilonia in Iraq ▶

© <https://it.pinterest.com>

Alla pagina seguente: ▶▶
Necropoli di El Minya,
Egitto

© Yann Arthus-Bertrand

Rovine di Chan Chan, ▼
Perù

© <https://it.pinterest.com>



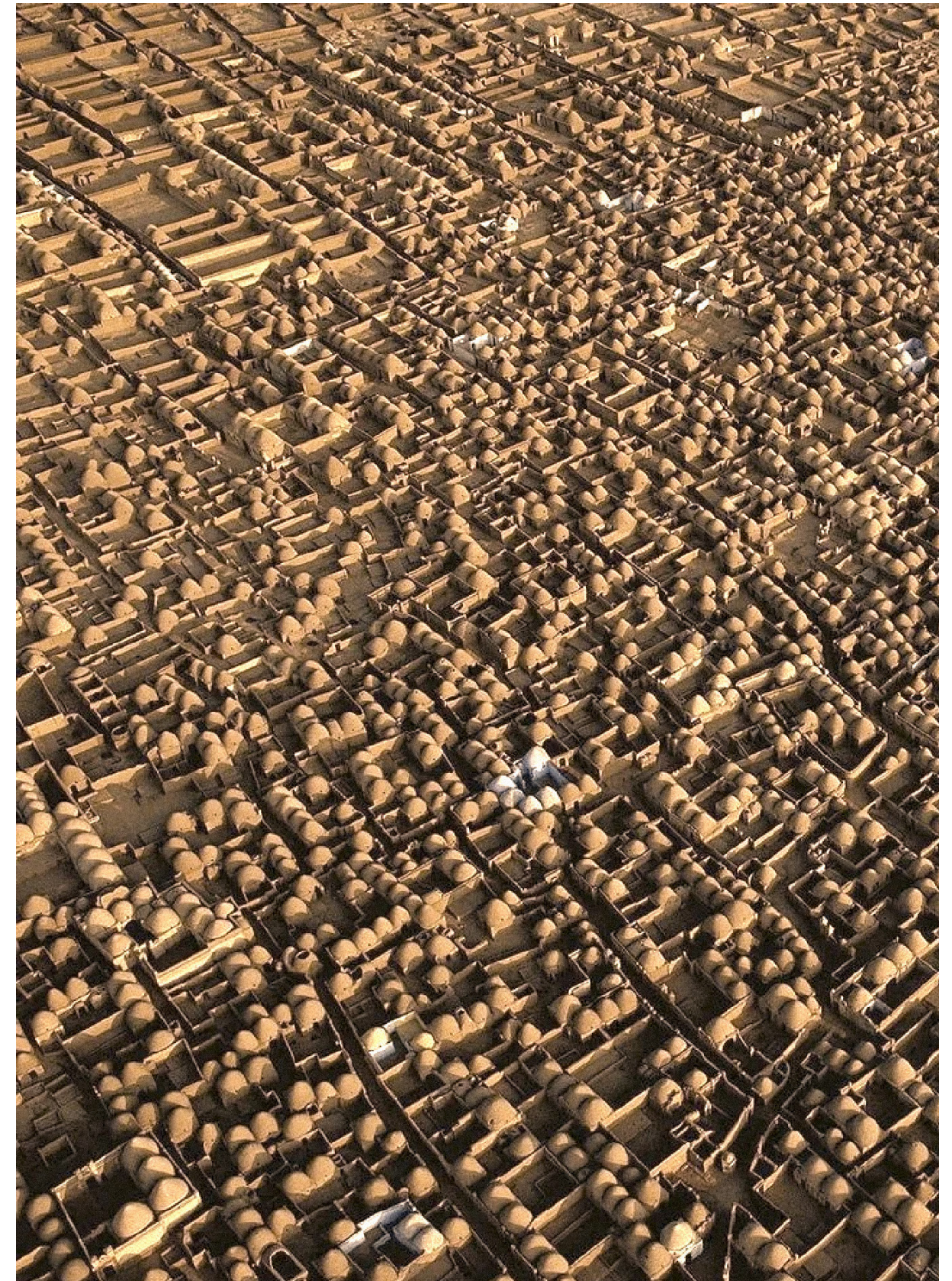
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



1.2 NUOVA VITA DI UN MATERIALE ANTICO

La terra è un materiale presente in tutto il mondo, dai deserti aridi del Nord Africa, alle regioni tropicali monsoniche dell'Asia, fino alle fredde terre dell'Europa centrale e del Nord America. Storicamente, il suo impiego come materiale da costruzione è stato dettato soprattutto dalla sua facile reperibilità. Gli scavi archeologici dimostrano che la terra cruda è stata il materiale più diffuso per l'edilizia, sviluppandosi parallelamente su tutti i continenti. Ogni cultura ha adattato le tecniche costruttive alle risorse locali e al clima, mantenendo però un elemento comune: la miscela di terra, acqua, inerti, fibre vegetali e organiche in proporzioni variabili.

L'arte di costruire con la terra non si limita alle abitazioni residenziali, ma abbraccia edifici religiosi, monumenti, statue, ziggurat e fortificazioni, molti dei quali oggi rappresentano un patrimonio architettonico di immenso valore. Pensiamo a città come Gerico o Chan Chan in Perù, Alhambra in Spagna, a Babilonia in Iraq, alla Grande Muraglia Cinese o alla piramide di Ramses II in Egitto. Questi esempi evidenziano la solidità e le qualità della terra come materiale da costruzione, smentendo i dubbi sulla sua stabilità e durata nel tempo, anche di fronte ai cambiamenti climatici.

Con le rivoluzioni industriali e le colonizzazioni dell'Ottocento, l'architettura in terra è stata progressivamente relegata a una tecnica arcaica e primitiva. Prima dell'introduzione del cemento, i Paesi industrializzati hanno iniziato a definire quello che sarebbe stato il futuro edilizio nei territori colonizzati. Lo sviluppo tecnologico e gli studi sul cemento e sul ferro nel secolo scorso hanno contribuito all'abbandono della terra cruda come materiale da costruzione.

Nell'immaginario comune, la terra è spesso considerata fragile, instabile, pericolosa e associata alla povertà e al degrado. Tuttavia, questa visione sta cambiando, grazie alle grandi sfide ambientali e sociali che il mondo si trova ad affrontare. Oggi,

la terra è l'unico materiale che rispetta pienamente i principi dell'architettura sostenibile. Non richiede manodopera altamente specializzata, è facilmente reperibile e completamente riciclabile. Questo garantisce una filiera produttiva a basso impatto ambientale e potrebbe ridurre l'uso eccessivo di materiali derivati dai combustibili fossili, come il cemento, la cui produzione è responsabile di circa 2,8 miliardi di tonnellate di CO₂ all'anno, pari al 5-9% delle emissioni globali.

Cemento e ferro, da soli, non saranno sufficienti a rispondere alle future esigenze edilizie, né potranno soddisfare i bisogni di una popolazione in costante crescita. La scarsità di risorse e la diminuzione della forza lavoro, soprattutto nel settore edile e manifatturiero, richiedono una riflessione sul futuro. Optare per l'uso della terra potrebbe rappresentare una risposta concreta alle sfide globali, offrendo un equilibrio tra manodopera, costi di produzione, consumi energetici, utilizzo di acqua e creazione di pari opportunità.

Negli ultimi anni, l'interesse degli istituti di ricerca pubblici e privati in architettura verso l'utilizzo della terra cruda come materiale da costruzione ha conosciuto una crescita significativa, spinto dalla necessità di trovare soluzioni sostenibili e a basso impatto ambientale per il settore delle costruzioni. Questo materiale, tradizionalmente impiegato in molte culture per le sue proprietà ecologiche e di comfort abitativo, sta vivendo una rinascita grazie agli avanzamenti nella tecnologia e nei processi produttivi. In particolare, istituzioni come l'IAAC (*Institute for Advanced Architecture of Catalonia*) e il gruppo *Emerging Objects* hanno esplorato il potenziale della terra cruda attraverso l'uso di tecnologie di fabbricazione digitale, come la stampa 3D e la robotica avanzata. Questi approcci innovativi consentono di superare i limiti storici del materiale, come la scarsa resistenza meccanica e la durabilità, permettendo di creare forme complesse, leggere e altamente personalizzabili. Il lavoro di IAAC ha dimostrato come la stampa robotica della terra cruda possa integrarsi nei processi costruttivi sostenibili,

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

mentre Emerging Objects ha sviluppato tecniche che combinano design computazionale e materiali naturali per esplorare nuove possibilità espressive e funzionali. In Italia l'azienda WASP ha assunto il ruolo di promotrice di queste tematiche con la realizzazione di sperimentazioni pratiche in collaborazione con centri di ricerca universitari e qualificati studi professionali. Tali sperimentazioni saranno ampiamente analizzate nel lavoro di tesi e rappresentano un importante punto di incontro tra tradizione e innovazione, aprendo la strada a un utilizzo più diffuso e tecnologicamente avanzato della terra cruda nelle architetture del futuro.

▶▶ Alla pagina seguente:
Il cantiere della moschea
di Djenné, Mali
© Immagini tratte da The
Art of Earth Architecture
- Jean Dethier | 2020.



▶ Il cantiere del progetto
TOVA, Barcellona
© IAAC

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



2 IL VIAGGIO DELLA TERRA CRUDA: Dall'autocostruzione all'industrializzazione

2.1 IL PATRIMONIO VERNACOLARE

L'architettura vernacolare, nel suo significato originario, è profondamente radicata nelle tradizioni locali, nelle tecniche costruttive tradizionali e nell'uso delle risorse naturali di una specifica regione. Il termine deriva dal latino *vernaculus* (locale, di casa), e si riferisce a un tipo di architettura che nasce spontaneamente all'interno di una comunità, senza l'intervento di professionisti, ma come espressione di una conoscenza pratica trasmessa di generazione in generazione. Sebbene possa sembrare "non progettata", questa architettura è in realtà estremamente sofisticata nel rispondere alle condizioni bioclimatiche e alle esigenze socioculturali di un determinato luogo.

Nel celebre saggio *La convivialità* (1973), Ivan Illich definisce l'architettura vernacolare come un modello di autonomia e sostenibilità che contrasta con la specializzazione e l'industrializzazione. Secondo Illich, l'architettura moderna, basata sulla standardizzazione e l'uso di tecnologie complesse, ha minato la capacità delle comunità di costruire e gestire autonomamente il proprio ambiente. Al contrario, l'architettura vernacolare rappresenta una risposta locale alle necessità quotidiane, riflettendo una profonda conoscenza del territorio e delle sue risorse naturali.

Per Illich, l'uso di materiali locali, facilmente reperibili come pietra, legno, bambù o, in molti casi, terra cruda, è un atto di resistenza culturale e sociale. Questa pratica promuove una connessione diretta tra le persone e l'ambiente, opponendosi all'omologazione imposta dai materiali industriali e favorendo una sostenibilità integrata. L'architettura vernacolare incarna un approccio olistico alla costruzione, coinvolgendo la comunità e promuovendo un modello di vita più equilibrato e meno dipendente da sistemi globalizzati.

Un esempio emblematico di architettura vernacolare è l'uso della terra cruda, che, per la sua abbondanza, le eccellenti proprietà termiche e la facile reperibilità, è stata una risorsa fonda-

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

mentale nella costruzione di edifici funzionali ed esteticamente raffinati sin dalle prime civiltà. In molte regioni geografiche – dalle Ande in Sud America, all'Africa del Nord, al Medio Oriente, fino ad alcune aree d'Europa – la terra cruda è stata utilizzata per costruire abitazioni, edifici pubblici e strutture funzionali come dighe e fortificazioni. Questo tipo di architettura ha non solo svolto un ruolo cruciale nella sopravvivenza delle popolazioni in ambienti difficili, ma ha anche dimostrato la capacità di queste comunità di sviluppare soluzioni sostenibili, a bassa intensità energetica, in perfetta sintonia con l'ambiente circostante.

La terra cruda non è solo un simbolo di sostenibilità, ma anche un esempio di adattamento alle specificità climatiche e geologiche di ciascuna regione. In ambienti desertici o semi-desertici, come il Nord Africa o la Penisola Arabica, la terra cruda è un materiale che risponde perfettamente alle esigenze di regolazione termica, accumulando calore durante il giorno e rilasciandolo lentamente durante la notte. In questo modo, le abitazioni rimangono fresche di giorno e calde di notte, riducendo al minimo la necessità di riscaldamento o raffreddamento artificiale.

Nel contesto delle aree temperate o montuose, dove le escursioni termiche sono più marcate, la terra cruda contribuisce a stabilizzare la temperatura interna, creando ambienti salubri e confortevoli, senza necessità di riscaldamento artificiale. Inoltre, la sua capacità di regolare l'umidità evita la formazione di condensa e migliora la qualità dell'aria. Prima dell'emergere della controcultura negli USA negli anni '60 e '70, l'architettura vernacolare in terra cruda non riceveva molta attenzione, ma fu grazie a Bernard Rudofsky che queste tecniche furono valorizzate, in particolare con la mostra *Architecture Without Architects* al Museum of Modern Art (MoMA) di New York nel 1964.

Rudofsky sfidò l'idea prevalente che l'architettura dovesse essere espressione di uno stile internazionale, razionale e cen-

tralizzato, esaminando le costruzioni vernacolari come esempi di grande sofisticazione e adattamento alle condizioni climatiche, sociali ed ambientali. Le costruzioni vernacolari, sebbene prive di tecnologie avanzate e materiali industrializzati, mostrano una straordinaria efficienza e una profonda connessione con le risorse locali e l'ambiente circostante. Rudofsky mise in discussione la superiorità dell'architettura accademica e invitò a riscoprire e valorizzare le tradizioni locali, sostenendo che l'architettura in terra cruda, in particolare, fosse una risorsa fondamentale per un'architettura più rispettosa dell'ambiente. L'architettura vernacolare in terra cruda è anche un'espressione culturale che rispecchia l'identità di una comunità. Ogni regione ha sviluppato soluzioni costruttive che rispondono alle sue specifiche esigenze climatiche e sociali, e la forma, la struttura e i dettagli decorativi delle abitazioni in terra cruda sono spesso visibili manifestazioni di storia collettiva e di un legame profondo con il territorio. La costruzione in terra cruda è quindi un atto collettivo che non solo soddisfa le necessità pratiche, ma fortifica i legami sociali, trasmettendo tradizioni e conoscenze pratiche.

Nel corso dei secoli, l'architettura vernacolare in terra cruda ha saputo adattarsi e rispondere alle sfide ambientali e sociali, rappresentando un modello ideale di architettura a basso impatto ambientale, sostenibile e in sintonia con le risorse naturali. Oggi, nonostante le difficoltà poste dalla modernizzazione e dall'industrializzazione, l'architettura in terra cruda sta vivendo una rinascita grazie alla crescente consapevolezza riguardo alla sostenibilità e le questioni ambientali. L'autocostruzione in terra cruda continua a essere una pratica di resilienza culturale e di sostenibilità, offrendo soluzioni pratiche ed ecologiche per il futuro.

In conclusione, l'architettura vernacolare in terra cruda, con la sua capacità di integrarsi perfettamente nel contesto locale e di rispondere alle necessità quotidiane, rappresenta una forma di costruzione che risponde non solo alle sfide ambientali,

ma anche alle sfide culturali e sociali del nostro tempo. Con un ritorno alle tecniche tradizionali e un rinnovato interesse per l'autocostruzione, la terra cruda emerge come una risorsa chiave per un futuro più sostenibile.

▼ Foto dell'ingresso alla mostra *Architecture Without Architects* al Museum of Modern Art (MoMA) di New York nel 1964.

© <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/3459?>

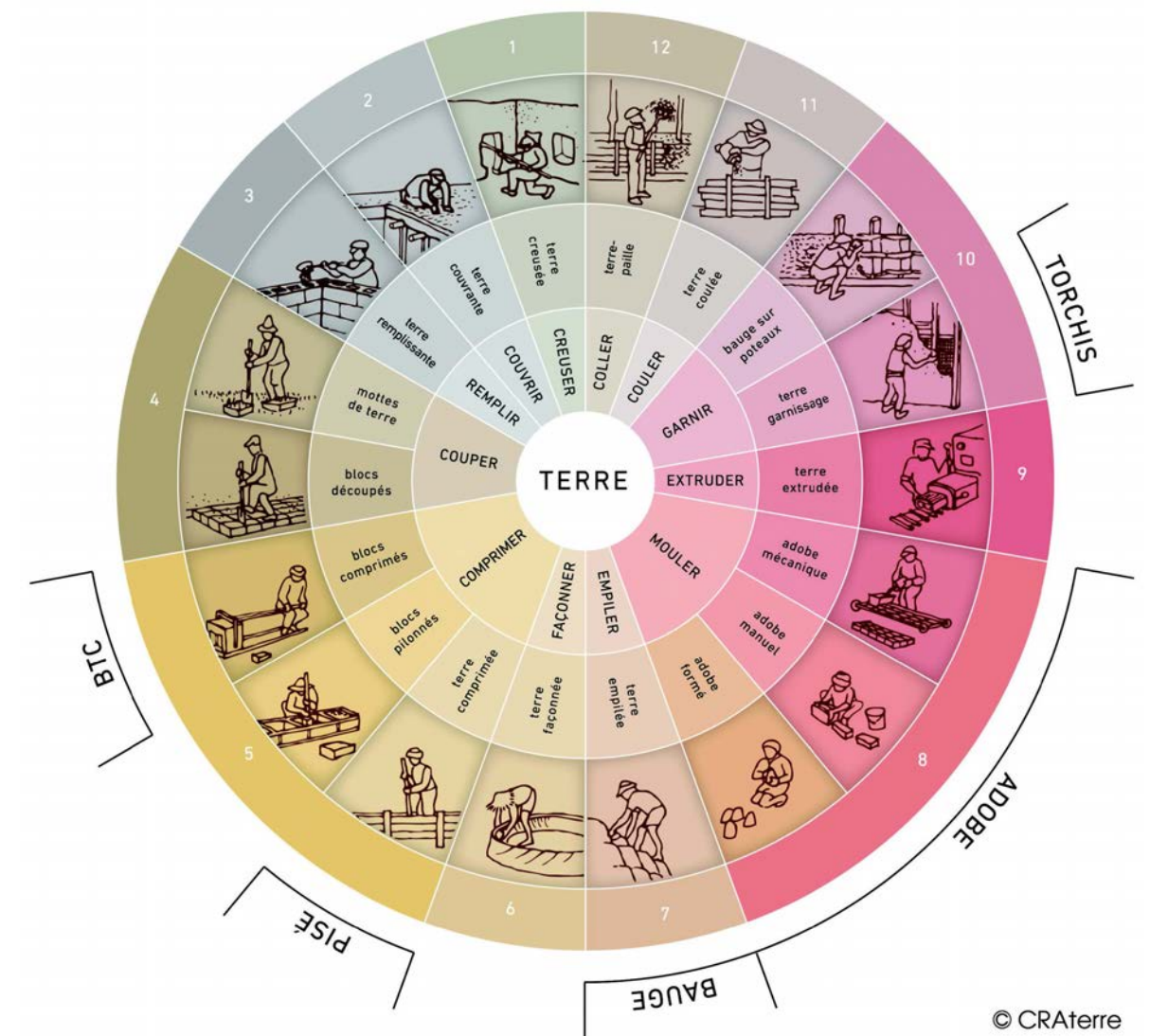


2.2 LE ANTICHE TECNICHE DI COSTRUZIONE IN TERRA CRUDA

Le qualità intrinseche del suolo, unite a fattori endogeni ed esogeni specifici di un determinato territorio, hanno portato alla definizione di numerose tecniche costruttive in terra cruda. Nonostante si siano sviluppate in contesti geografici, climatici e socioculturali molto diversi, queste tecniche sono però riconducibili a maniere di operare simili e ben riconoscibili tra loro. Sono state, pertanto, classificate e codificate secondo criteri condivisi e riconosciuti a livello internazionale.

Nel 1989, il Centro Internazionale per la Costruzione in Terra, CRAterre, ha pubblicato in *Treatise on Earthen Construction*, la tavola sinottica delle tecniche costruttive in terra, che illustra e sintetizza in un unico schema un patrimonio di conoscenze pratiche estremamente diversificato a livello diatopico e diacronico¹. La rappresentazione grafica riporta in un diagramma circolare diviso in 12 settori le differenti procedure di lavorazione e posa in opera della terra (terra scavata, terra coprente, terra riempiente, terra ritagliata in blocchi, terra compressa, terra modellata, terra impilata, terra sagomata, terra estrusa, terra colata, terra-paglia e terriccio su canne). Ciascuna tecnica è collocata in relazione alle altre per somiglianze, differenze e punti di contatto. I settori del grafico sono, a loro volta, raggruppati in tre grandi classi: massa monolitica, muratura formata da piccoli elementi e riempimento di strutture a telaio.

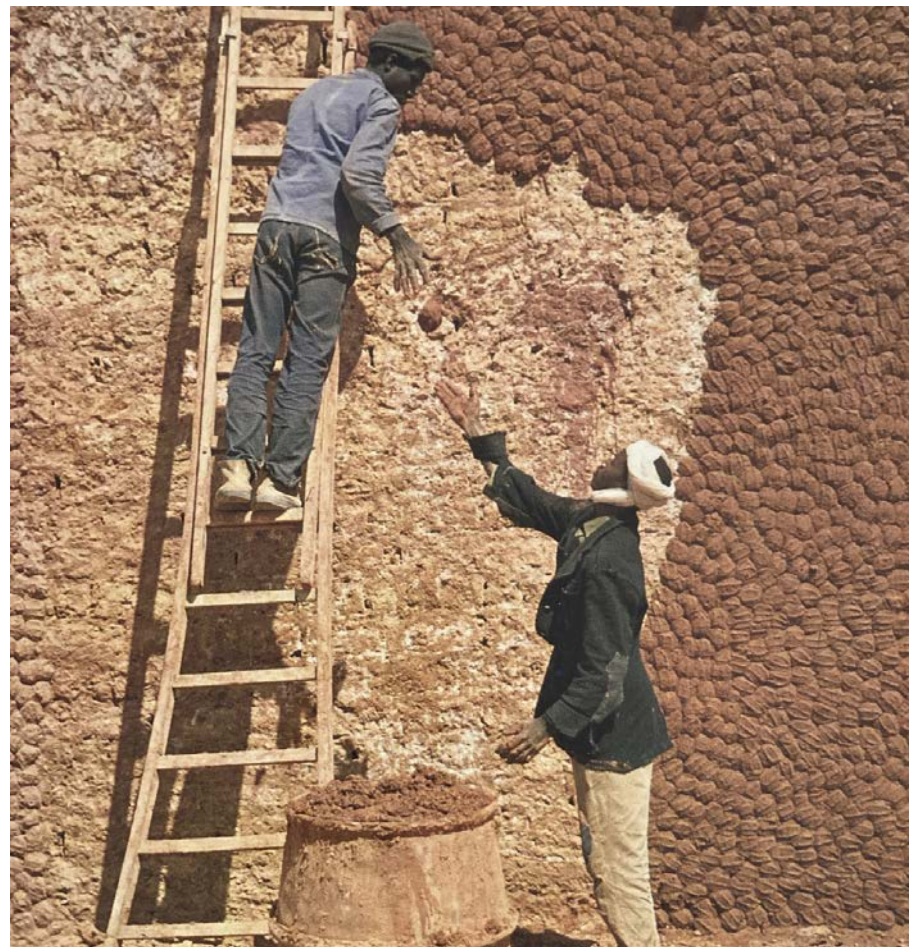
Di tutti i sistemi rappresentati, quattro si distinguono per la loro antichità e continuità di utilizzo fino ai giorni nostri: adobe, bauge, pisè e torchis. I primi tre utilizzano la terra come materiale portante mentre l'ultimo come tamponamento.



Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

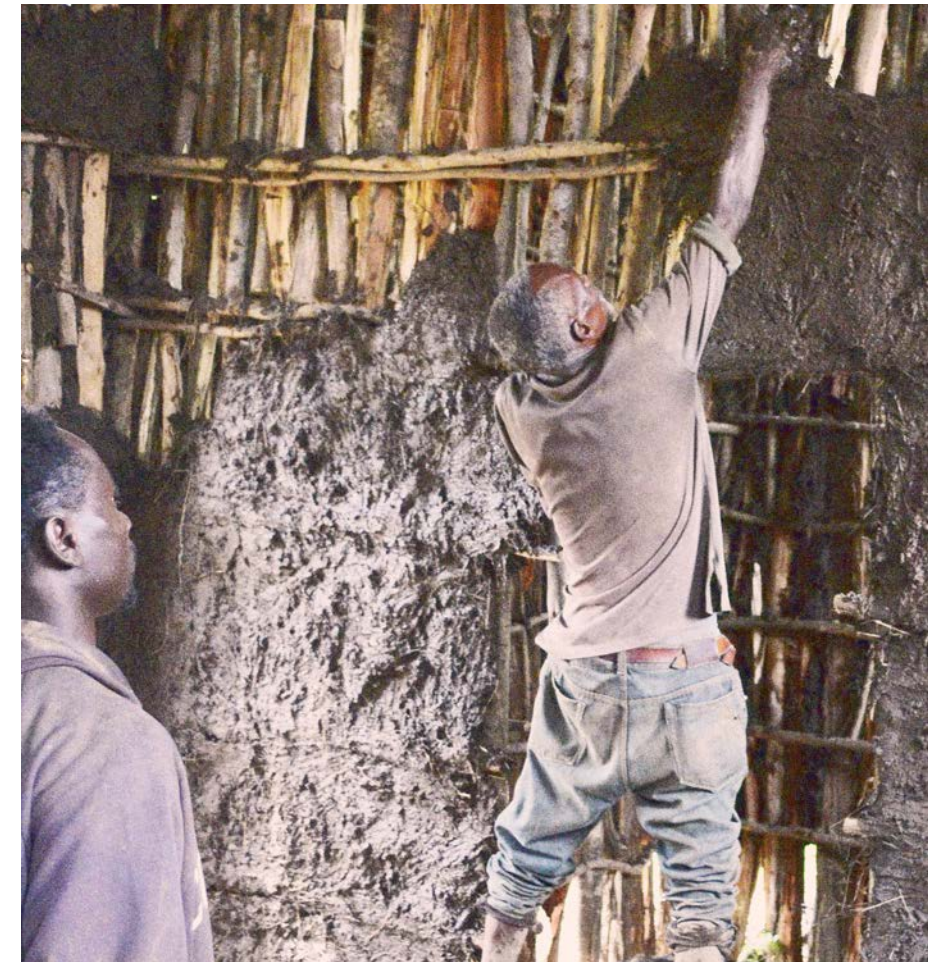


Tecnica dell'Adobe ▲



Tecnica del Bauge ►
 © Immagini tratte da The Art of Earth Architecture - Jean Dethier | 2020.

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀Tecnica del Torchis

▼Tecnica del Pisè
 © Immagini tratte da The Art of Earth Architecture - Jean Dethier | 2020.



2.2.1 ADOBE

L'adobe² è il mattone ottenuto dall'essiccazione al sole di un blocco di terra cruda precedentemente modellato a mano o sagomato all'interno di uno specifico stampo.

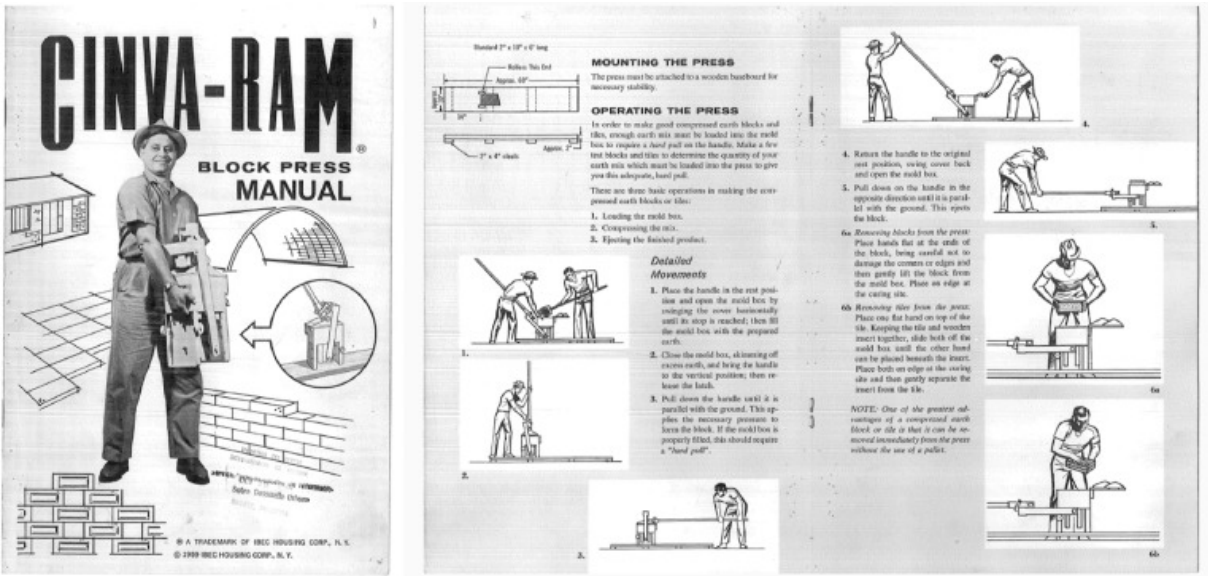
La tecnica è nata in Mesopotamia nel IX millennio a.C., si è poi diffusa rapidamente nelle altre zone del Mediterraneo fino ad essere trasportata dai colonizzatori europei in America e Australia nel XV sec.

Il termine spagnolo adobe deriva dalla parola araba mattone, *at-tub*, a sua volta, mutuata da quella egiziana *tôôbe* o *tôbi*. *Làdiri*, *banco*, *toub* e *clay lump* (o *mud brick*) sono, invece, le denominazioni usate per indicare questi stessi blocchi in Sardegna, Africa occidentale, nelle zone francofone dell'Africa e nei paesi di lingua inglese.

Dimensioni dei mattoni e composizione dell'impasto di terra variano a seconda delle zone di produzione; la forma rettangolare rappresenta, invece, l'evoluzione di un'originaria forma conica in cilindro-conica, dentiforme e infine parallelepipedo³. La tradizionale preparazione dell'adobe prevede l'impiego di un composto allo stato plastico di acqua e terra di granulometria fine, al quale possono essere aggiunte fibre vegetali, come lolla di riso, pula di miglio fermentata, fili d'erba sminuzzati o paglia essiccata per migliorarne la resistenza a trazione. Un'altra diffusissima soluzione consiste nell'aggiungere sabbia per evitare il restringimento e le fessurazioni in caso di terre molto argillose, oppure nell'incorporare materiale organico, come sterco di bovini, ovini e cammelli, per aumentare la compattezza dei blocchi. I componenti dell'impasto sono, quindi, miscelati per mezzo di badili, con i piedi o servendosi del bestiame; il composto, lasciato preventivamente riposare, viene versato poi in forme di legno standardizzate⁴. Oltre a questo procedimento nelle oasi sahariane è diffusa la tecnica del taglio manuale: l'impasto viene steso uniformemente sul terreno e tagliato mediante una lama metallica.

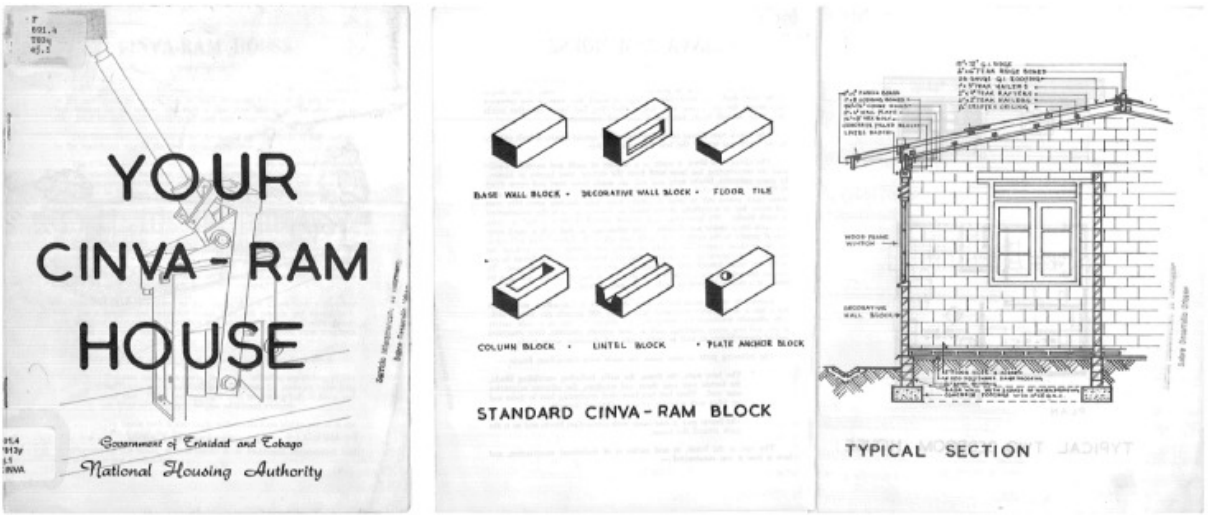
I mattoni così ottenuti sono lasciati essicare al sole per periodi variabili a seconda dell'area climatica e della stagione, solitamente tra una e tre settimane; durante questa fase i blocchi vengono regolarmente inumiditi per evitare un'essiccazione troppo rapida che potrebbe causare fessurazioni.

La tecnica di fabbricazione è stata nel corso del tempo perfezionata e meccanizzata: alla produzione artigianale si è affiancata quella di tipo semi-industriale che ha previsto la compressione e compattazione meccanica della terra, eventualmente stabilizzata con cemento, in stampi o casseforme di legno o ferro. Nel 1952, fu inventata la prima pressa portatile ad azione manuale, la Cinva-Ram⁵, dall'ingegnere colombiano Raúl Ramírez. Questa innovativa macchina ha rivoluzionato la modalità di fabbricazione dei mattoni in terra grazie alla sua maneggevolezza e alla capacità di ridurre i tempi di produzione. La Cinva-Ram veniva, infatti, fornita come kit, facilmente trasportabile anche sul dorso di un mulo, e permetteva ad un singolo uomo di produrre fino a 100 blocchi in 8 ore di lavoro. A partire dal 1970, una nuova generazione di presse meccaniche motorizzate è apparsa sul mercato internazionale, due di queste si sono rivelate particolarmente efficaci: la Terstaram, inventata in Belgio da Fernard Platbrood e l'Auram, sviluppata dall'Auroville Earth Institute in India. I mattoni ottenuti con questi sistemi sono noti con il nome di CEB (*Compressed Earth Brick*) o BTC (Blocchi di Terra Compressa). I CEB e BTC rappresentano l'evoluzione tecnica dell'adobe per quanto riguarda regolarità della forma e prestazioni meccaniche⁶. Il costo unitario di uno di questi mattoni è, tuttavia, piuttosto elevato rispetto ad un adobe tradizionale o anche ad un mattone forato in cemento. Questa differenza di prezzo non ne ha permesso la diffusione su larga scala.



Copertina e pagine di un opuscolo edito da Metalebec che descrive in dettaglio il funzionamento della macchina CINVA-Ram. © Metalibec. 1959. Manuale della pressa per blocchi CINVA-RAM. Archivio Centrale e Storico della Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Collezione Centro Interamericano di Vivienda-CINVA, Box 16.

La pressa manuale Terstaram.



La copertina e le pagine di un opuscolo pubblicato dalla National Housing Authority di Trinidad e Tobago che descrive in dettaglio la tipologia di blocchi prodotti con la macchina CINVA-Ram. © Governo di Trinidad e Tobago. Autorità nazionale per l'edilizia abitativa.



La pressa manuale Auran

2.2.2 PISÉ

Assieme all'adobe, la terra battuta è la tecnica costruttiva più diffusa al mondo.

È tradizionalmente utilizzata in Africa, Sud America ed Europa, senza notevoli varianti; Marocco, Spagna e Francia vantano le più varie e sofisticate applicazioni, sia tradizionali che contemporanee.

Questa tecnica è nota come *pisé de terre* in Francia, *tapia* in Spagna, *taipa* in Portogallo e *rammed earth* nel Regno Unito. Per l'edificazione di murature in terra battuta viene impiegata terra magra o medio-grassa di granulometria grossolana, priva di fibre vegetali o composti organici, e allo stato leggermente umido. L'impasto contiene un mix di sassi, ghiaia, sabbia, limo ed argilla in proporzioni equilibrate. È una sorta di cemento naturale molto duro in cui l'argilla garantisce la massima coesione e gli inerti assicurano quella rigidità che permette al materiale di non restringersi e fessurarsi.

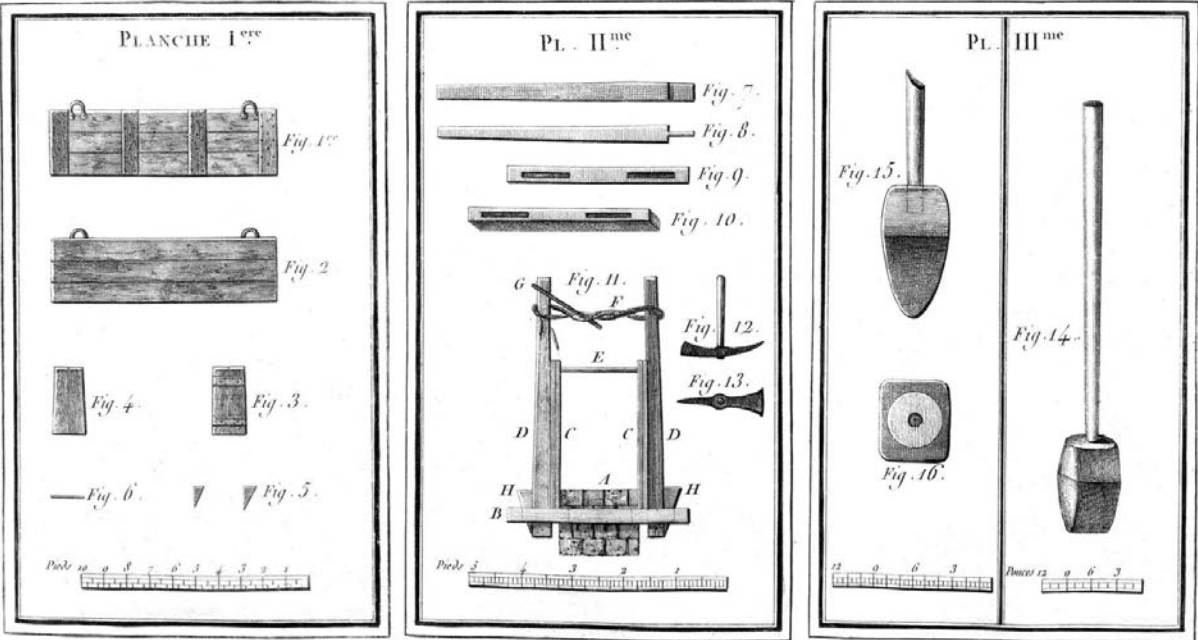
Il composto terroso ottenuto viene gradualmente versato e costipato per strati successivi, non più alti di 30 cm, fino ad ottenere una massa resistente ed omogenea. La compattazione avviene battendo la terra con l'ausilio di un pillo, un grosso mazzapicchio di legno di forma tronco-conica munito di uno o due manici, all'interno di una cassaforma mobile in legno o metallo di lunghezza variabile da 100 a 200 cm e larghezza pari allo spessore del muro che si intende ottenere. I due pannelli che compongono la cassaforma sono tenuti in posizione da ferri tiranti interni alla parete, o da strutture di contenimento esterne. La struttura lignea viene rimossa dopo l'elevazione del primo tratto di muro e riposizionata in contiguità a questo fino a completare tutte le strutture di elevazione. Risultato delle operazioni di battitura e compattazione è la soppressione dell'aria dal composto di terra e conseguentemente la diminuzione di volume dello stesso e la solidità delle pareti ottenute; il tipo di coesione che viene prodotta artificialmente attraverso

l'impiego del pestello ligneo produce un effetto naturale comparabile a quello della formazione delle pietre.

Sul pisé francese si realizza, infine, un "fior di pisé": le superfici esterne vengono rese estremamente lisce e raffinate utilizzando una terra molto fine arricchita da calce o cemento.

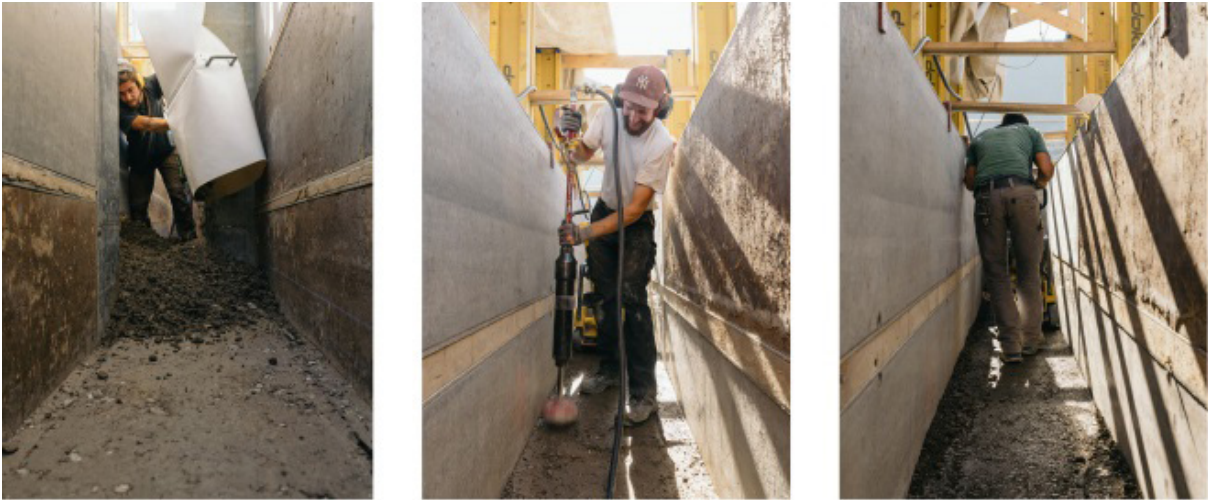
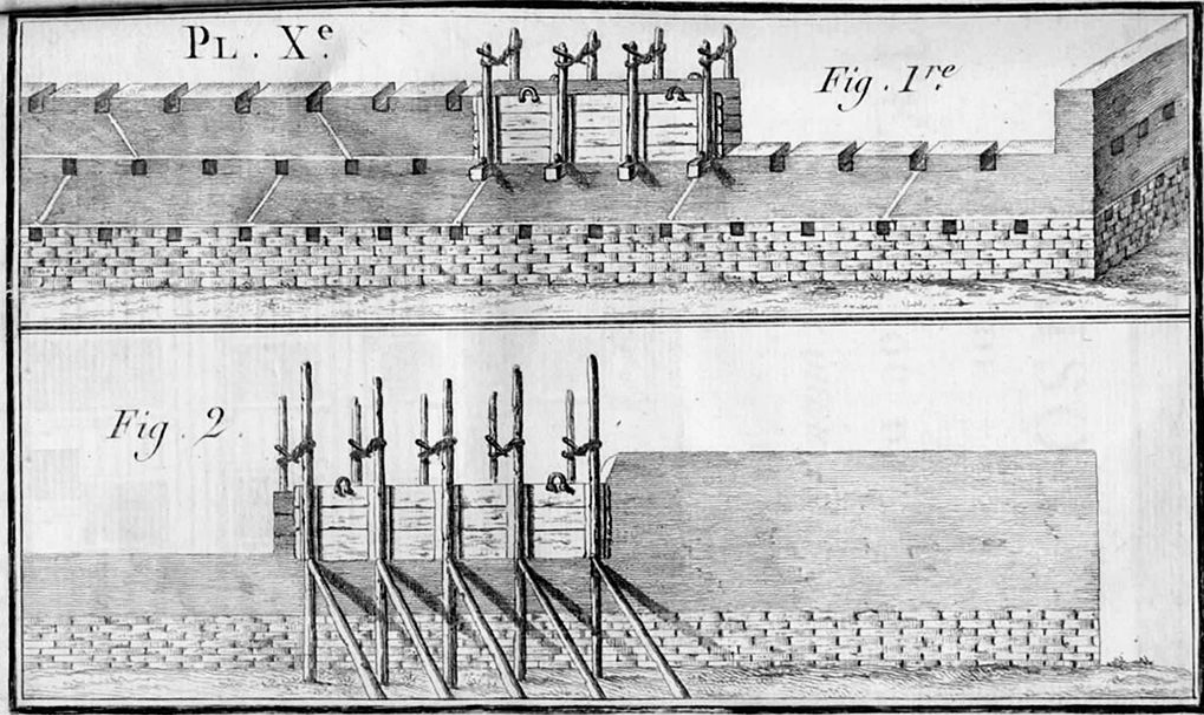
La principale caratteristica degli edifici costruiti in terra battuta è la particolare conformazione monolitica e stratificata delle murature, oltre che la durabilità nel tempo.

Nel 1790 Jean-François Cointeraux ha modernizzato questa tecnica, introducendo il nouveau pisé che consiste in mattoni ottenuti comprimendo la terra cruda mediante una pressa ricavata da un torchio per il vino che l'inventore fece brevettare con il nome la Crécise. Poiché questi mattoni potevano avere dimensioni notevoli, Cointeraux li chiamò "finte pietre". Nel XXI sec. la tecnica è stata ulteriormente aggiornata stabilizzando la terra con piccole aggiunte di cemento⁷, sostituendo gli strumenti di compattazione manuale con compressori automatici (come i vibrocompattatori) e realizzando segmenti di muro prefabbricati in stabilimento per poi assemblarli meccanicamente in cantiere, dopo l'essiccazione. Pionieri di queste innovazioni sono Nicolas Meunier e Martin Rauch in Europa, Rick Joy negli USA ed Elie Mouyal in Marocco.



▲ Gli attrezzi necessari per la realizzazione di opere in pisé (in alto)

▼ Illustrazioni raffiguranti la realizzazione di un muro in pisé (in basso)
© Cointeraux - Ecole d'architecture rurale



▲ La realizzazione di un muro il pisé in opera con l'ausilio di vibrocompattatori

◀ Processo di realizzazione di un pannello di muro in pisé prefabbricato per l'edificio Ricola House
©Herzog&deMeuron

2.2.3 BAUGE

Quella del bauge è un'altra forma tradizionale di costruzione in terra cruda; la tecnica si è diffusa prevalentemente in Europa, soprattutto in Francia, Inghilterra, Irlanda e Abruzzo, dove è conosciuta rispettivamente con il nome di *bauge*, *cob*, *mud* e *massone*. Anche in Asia, Africa e America viene utilizzato questo procedimento costruttivo ma con delle varianti. L'impasto del bauge contiene acqua, argilla, sabbia e fibre vegetali in parti equilibrate così da non risultare né troppo secco né troppo umido, non deve essere né difficile da lavorare né privo di coesione; la qualità plastica è un requisito molto importante per la corretta messa in opera. Gli ingredienti vengono miscelati su una superficie piana, il cosiddetto piano di battitura, o in una fossa. La miscelazione avviene spesso manualmente o con l'aiuto di animali da tiro, che calpestano il materiale fino a ottenere una consistenza plastica ed omogenea. Il composto viene quindi modellato in pani cilindrici o emisferici che vengono lasciati riposare per un giorno e poi posizionati a fresco, secondo ricorsi paralleli, direttamente sul luogo di costruzione. Per la posa in opera non si utilizzano casseforme ma ogni strato viene modellato impilando i pani e compattandoli a mano o con mazze di legno⁸. Solitamente si lavora con ricorsi di 20-30 cm, che vengono sovrapposti una volta che il livello inferiore ha iniziato ad asciugarsi ma non è ancora completamente indurito⁹. Una volta eretta la parete, la superficie viene regolarizzata asportando con una pala tagliente o una vanga le imperfezioni superficiali dovute al tipo di messa in opera e alla presenza della paglia.

I tempi di asciugatura delle murature in bauge sono lunghi, variano da 6 a 9 mesi e tra la realizzazione di un ricorso e quello successivo è necessario aspettare intervalli che variano da una giornata a più di una settimana, così da permettere all'impasto di stabilizzarsi fino ad ottenere un'adeguata resistenza a compressione.

Solitamente la sezione delle pareti costruite con questa tecnica è soggetta ad una progressiva rastremazione dalla base alla sommità dell'edificio: il risultato è una struttura monolitica e portante, con spessori molto ampi che permettono una buona inerzia termica e uno sfasamento termico ottimale. Con un'adeguata manutenzione, queste pareti sono, infatti, in grado di adattarsi sia ai climi rigidi e piovosi, che a quelli caldi e secchi. Nel Regno Unito questa tecnica è stata adottata soprattutto nel sud-ovest e nel nord del paese dove sono stati costruiti edifici di due piani con coperture in paglia. Nel Devon, K. McCabe è attivo nel recupero e nella realizzazione di nuovi edifici in cob, tra cui il cottage a zero emissioni, Dingle Dell, iniziato nel 2010 e ancora in fase di completamento. In Francia il bauge è presente in Normandia, in Bretagna e nella Loira ed è attualmente soggetto a una ripresa anche per quanto riguarda gli edifici di nuova costruzione. Qui esiste anche il bauge coffrée, una variante che prevede l'utilizzo di casseforme rimovibili in legno. In Abruzzo, la tecnica del massone partiva dalla preparazione di un particolare impasto definito *maltone*, la terra e l'acqua piovana venivano miscelate in una buca avvalendosi della forza degli animali. Le donne, poi, realizzavano manualmente i massoni, grossi blocchi cilindrici di 40 cm di altezza e 15 cm di diametro, che venivano lasciati maturare per una notte nel cretorio, protetti da strati di paglia sovrapposti. Tramite passamano, i massoni ancora freschi erano spostati in cantiere, quindi posti in opera per impilatura in strati omogenei sulla parete e battuti con pestoni. Si lasciava riposare fino al giorno successivo la porzione di muro eretta, per poi passare alla rifilatura a piombo con una vanga. Attualmente è in corso una sperimentazione sull'utilizzo della canapa come additivo alla terra d'impasto del massone.

Nei paesi asiatici come lo Yemen viene utilizzata una tecnica molto simile a quella abruzzese, nota come *façonnage* diretta. Dall'impasto maturato di terra e paglia vengono modellati a mano dei blocchi grezzi delle dimensioni di una pagnotta,

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

posati l'uno dopo l'altro fino a 50 cm di altezza senza l'ausilio di casseforme; ognuno di questi strati viene poi essiccato all'aria per diversi giorni prima della posa dello strato successivo.

Il paramento esposto viene, infine, rifinito con una battola in legno da muratore, un rullo o un fratazzo. Questa operazione limita la porosità della terra in maniera efficace laddove non si applica lo strato di intonaco.

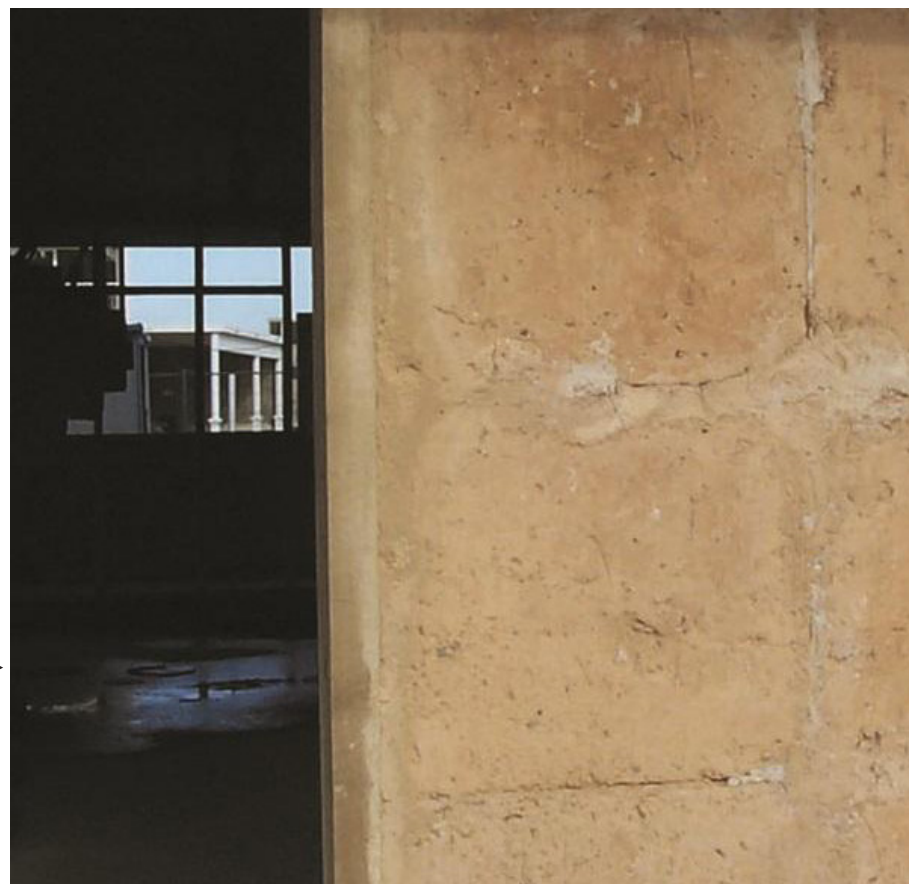
Un esempio emblematico di utilizzo moderno del bauge è rappresentato dall'edificio Salvatierra di Rennes progettato da Jean-Yves Barrier nel 2003 con materiali naturali e tecnologie passive. La facciata meridionale di questa residenza collettiva è stata costruita con blocchi prefabbricati di bauge in modo da ridurre al minimo i consumi energetici: lo spessore dei blocchi (circa 50 cm) garantisce, infatti, un'elevata capacità isolante e una grande inerzia termica, mantenendo la temperatura interna stabile.

Salvatierra è un progetto prototipo che fa parte del programma CEPHEUS (Cost Efficient Passive House as European Standard) lanciato nel 2004 dalla Commissione Europea per la costruzione, la valutazione scientifica e la diffusione di prototipi di abitazioni ad alta efficienza energetica. Innanzitutto, risponde ai classici principi bioclimatici grazie all'orientamento nord-sud degli appartamenti e alla protezione dai venti dominanti. C'è poi l'utilizzo di materiali ecologici: un telaio in cemento armato sostiene facciate realizzate con blocchi di bauge, un impasto di terra cruda e paglia, che garantisce stabilità termica grazie alla sua elevata inerzia termica.

► Alla pagina seguente:
Facciata dell'edificio

► Dettaglio del muro in
bauge

© <http://jean-yves-barrier.fr/fr/jyb-architecture/residence-salvatierra>



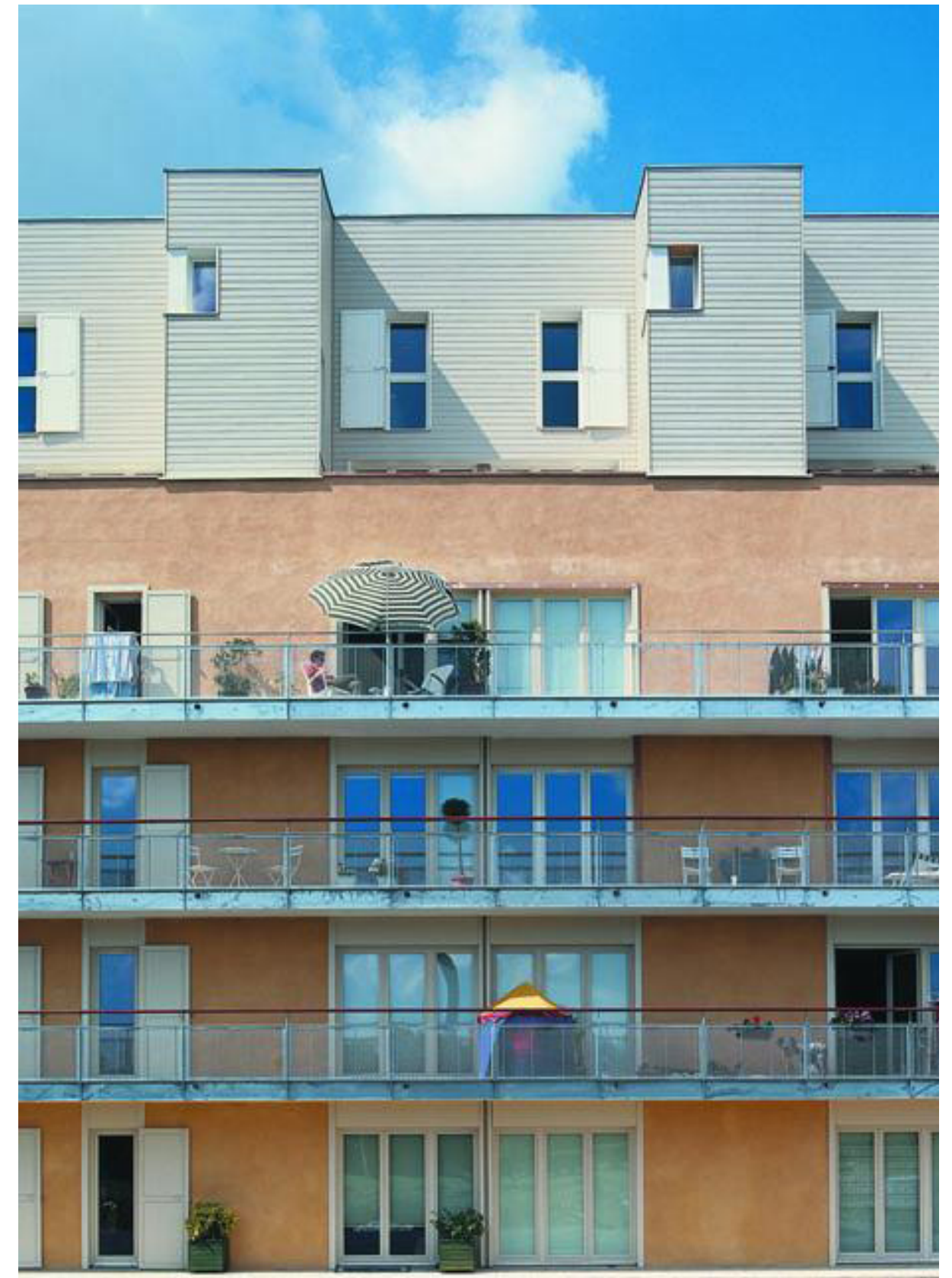
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



2.2.4 TORCHIS

Il torchis è una tecnica costruttiva mista che associa legno e terra cruda. Gli elementi architettonici degli edifici costruiti in torchis hanno una funzione statica diversa: il ruolo portante è affidato agli elementi lignei che formano l'ossatura, mentre la terra, spesso unita a elementi vegetali o sabbia, è utilizzata come tamponamento (*pan de bois*) di una struttura a graticcio o rivestimento (*colombage*) di un telaio formato da travi e pilastri di rami, stecchi di legno o bambù, intrecciati, legati o inchiodati tra loro.

Diffuso in Europa centrale e occidentale¹⁰, il torchis è nato come risposta alle necessità abitative di popolazioni che disponevano di risorse naturali limitate. Inoltre, la possibilità di realizzare la copertura prima del completamento delle pareti perimetrali ha reso il procedimento particolarmente adatto soprattutto a quelle zone caratterizzate da climi umidi.

La tecnica è nota in Germania come *Lehmfachwerk*¹¹, in Inghilterra come *half-timber* (nelle varianti del *wattle and daub* e del *mud and stud*¹²) e in Francia come torchis (nelle varianti del *colombage* e del *pan de bois*). In Italia ci si riferisce a questa tecnica come terra-paglia o terra alleggerita, per l'utilizzo di un'alta percentuale di fibre vegetali nell'impasto. La tecnica prevede che l'impasto di terra venga lanciato contro la struttura, arrotolato intorno a stecchi poi inseriti in apposite scanalature del telaio oppure sia avvolto direttamente intorno agli elementi di supporto. Dopo la posa in opera, le superfici vengono regolarizzate e levigate. Nel caso in cui alla terra è affidato il ruolo di riempimento, l'impasto è inserito in casseforme a perdere o successivamente removibili, quindi compattato a mano o per mezzo di appositi strumenti. Un'altra versione della tecnica mista che accosta terra e legno vede l'utilizzo di mattoni di terra cruda come riempimento della struttura in legno. Un'evoluzione è rappresentata dai pannelli prefabbricati in terra alleggerita per muri e solai, da giustapporre direttamente

alla struttura, evitando i lunghi tempi di asciugatura tipici della tecnica tradizionale. Nel Quartier-Terra di L'Isle-d'Abeau, situato nella regione del Lionese, il torchis è stato reinterpretato, offrendo una soluzione contemporanea alle necessità di sostenibilità e urbanizzazione: questo esempio è, infatti, un modello per l'architettura bioclimatica e per il recupero delle tecniche tradizionali in un contesto di innovazione architettonica e tecnologica.

▼ Prospetto esterno di un edificio in Torchis con copertura a falde nord-europa
© Andrew Balet



2.3 LA MODERNA ARCHITETTURA IN TERRA:

Francois Cointeraux e Hassan Fathy

A partire dall'Illuminismo l'uso della terra cruda nelle costruzioni ha subito tre principali fasi di sviluppo e aggiornamento. La prima risale alla fine del XVIII sec. in Francia e viene incarnata dalla figura di François Cointeraux, che ha introdotto tecniche e idee innovative nell'ambito dell'architettura in terra battuta. Seguono gli avanzamenti scientifici, tecnologici ed educativi apportati da Hassan Fathy in Egitto nella seconda metà del XX sec. E, infine, all'inizio del XXI sec. la terra cruda ha conosciuto una nuova diffusione a livello globale come soluzione ecologica in grado di mitigare gli effetti del cambiamento climatico e a facilitare la transizione verso fonti energetiche sostenibili.

François Cointeraux (Lione, 1740 - Parigi, 1830) si affermò come figura centrale in Francia tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo, proprio mentre il paese stava vivendo trasformazioni politiche, sociali ed economiche radicali. Con la Rivoluzione Francese del 1789 e l'affermazione dei principi illuministi, la società francese si riorganizzò sui valori di Liberté, Égalité et Fraternité, sanciti nella Dichiarazione dei Diritti dell'Uomo e del Cittadino. A livello economico, le teorie fisiocratiche mettevano al centro dello sviluppo nazionale l'agricoltura, opponendosi al mercantilismo e favorendo l'impiego di nuove pratiche agricole e l'acquisto di terreni. Inoltre, la vendita dei beni nazionali favorì l'ingresso di nuovi investitori urbani nelle proprietà rurali, mentre i vecchi proprietari terrieri si adattavano ai cambiamenti modernizzando le loro tenute. Tuttavia, l'assenza di architetti specializzati nell'edilizia rurale portò molti a rivolgersi a maestranze locali o a tecnici senza una formazione accademica specifica nel settore.

In questo contesto si inserisce François Cointeraux, il quale diede un contributo significativo al progresso dell'architettura rurale grazie alla sua esperienza diretta nel settore edilizio. Avvicinatosi sin da giovane all'agricoltura e all'edilizia attraverso le

attività imprenditoriali della sua famiglia, Cointeraux consolidò la sua posizione grazie all'eredità di uno zio e alla dote della moglie, affermandosi come appaltatore edile e poi come architetto nelle aree di Lione, Loyasse e Vaise. Qui esercitò anche altri mestieri, tra cui quello dell'agricoltore, del perito edile, del perito geometra, del capomastro e dell'appaltatore.

Perciò, Cointeraux affermò con un certo orgoglio:

Manca al pubblico un uomo in grado di muovere sia la cazzuola che il martello, sia la vanga che la zappa. Mi presento per adempiere a queste due funzioni, e mostrerò come sia possibile, migliorando una fondazione, costruire un piccolo edificio: mi avvarrò della stessa sapienza del viticoltore, dell'aratore e del giardiniere, per istruire dei costruttori.

Cointeraux rappresenta, quindi, uno dei pochi teorici dell'architettura rurale provenienti dalle classi lavoratrici, in grado di affrontare le problematiche dal punto di vista del grande proprietario terriero, dell'agronomo e dell'architetto. Non era un osservatore esterno che proponeva riforme teoriche, quanto piuttosto uno di quelli di cui pretendeva di migliorare la vita. Si vedeva nella posizione unica di rappresentare il proletariato agricolo ed era motivato da un insieme più ampio di convinzioni sul rapporto dell'umanità con la terra. E grazie alla sua duplice competenza nell'agricoltura e nell'edilizia, Cointeraux divenne uno specialista dell'arte del costruire nelle campagne, assumendo una missione di servizio per l'intera comunità che nulla aveva a che vedere con il simbolismo astratto o gli ideali estetici, quanto piuttosto con la produzione agricola e le esigenze dei contadini.

Geniale è il neologismo "Agritettura", da lui coniato, che rifletteva una visione condivisa da altri teorici dell'epoca¹³, secondo cui agricoltura e architettura erano arti interdipendenti, che, unite, avrebbero potuto servire al meglio le esigenze pratiche e sociali del mondo rurale ed essere i fondamenti alla base

dell'economia nazionale. Nel 1797 Cointeraux dichiarò:

L'architettura, di tutti i tempi, è sempre stata trattata a parte. L'agricoltura, di tutti i tempi, è sempre stata indagata separatamente. Questo è un errore: le due arti possono solo essere approfondite fondendo i loro principi in un unico crogiolo della mente. Il risultato finale sarà una nuova scienza, che io opportunamente chiamo Agritettura.

Questa disciplina, anticipatrice delle attuali green architecture e urban agriculture, mirava ad integrare le specifiche caratteristiche biologiche e geografiche degli ecosistemi nella pianificazione del territorio, promuovendo un'architettura sostenibile e rispettosa dell'ambiente in cui si inseriva. L'intento era anche quello di superare la tradizionale distinzione tra città e campagna, favorendo un'urbanizzazione che si adattasse armoniosamente a tutti i territori abitati.

Dal punto di vista pratico, Cointeraux modernizzò l'antica tecnica costruttiva di origine vernacolare, nota come pisé de terre, che a quel tempo era limitata alla Francia sud-orientale e in particolar modo alla regione dell'Auvergne Rhône-Alpes. Cointeraux conobbe la tecnica della terra battuta proprio nella sua città natale, Lione, lavorando come praticante e imprenditore fino ai cinquant'anni.

Il Nouveau Pisé era una versione più razionale, standardizzata e versatile della formula compositiva e del procedimento di esecuzione tradizionale, che rispondeva meglio alle nuove esigenze sociali e ai nuovi ideali di democratizzazione e sostenibilità.

Il processo fu perfezionato a partire dal dosaggio dei componenti dell'impasto: argilla, sabbia e ghiaia dovevano essere miscelate in proporzioni precise al fine di ottenere una muratura monolitica più compatta, omogenea e resistente all'erosione e alle intemperie. La terra veniva battuta e stratificata in modo estremamente uniforme all'interno di casseforme modulari e

mobili che potevano essere smontate e rimontate man mano che la costruzione procedeva in altezza, garantendo continuità superficiale e strutturale alle pareti. La metodologia standardizzata¹⁴ rendeva il processo prevedibile, efficiente ed economico in termini di costi di manodopera e tempi di esecuzione, dal momento che persone con scarsa formazione potevano costruire abbastanza celermente edifici solidi e duraturi.

In risposta alla richiesta crescente di alloggi economici da parte delle nuove classi di braccianti agricoli che avevano occupato le terre espropriate all'ancien régime, Cointeraux illustrò le potenzialità del Nouveau Pisé in diversi progetti di abitazioni, adattabili alle varie classi sociali. Famosa è la raffigurazione di una casa per i cittadini poveri e un'altra per quelli benestanti in cui l'unica differenza risiede nell'ornamentazione applicata alla facciata.

L'uso della terra battuta fu ampiamente adottato nella città di Lione e nei suoi sobborghi, dove blocchi abitativi dai 5 ai 7 piani furono costruiti all'inizio del XIX sec.

L'attivismo di Cointeraux non si limitò, però, esclusivamente all'ambito residenziale ma incluse anche la progettazione di edifici destinati allo sviluppo economico, come fattorie, magazzini e prime manifatture tessili dell'era industriale.

E sebbene i principi cardine di questa attività compositiva fossero economia, efficienza, igiene, moralità, le soluzioni progettuali non erano prive di ambizioni estetiche.

L'obiettivo era, infatti, quello di realizzare, per mezzo della nuova tecnica, costruzioni che si integrassero armoniosamente nell'ambiente, fornendo una risorsa economica e sociale per il rinnovamento rurale e industriale della Francia post-rivoluzionaria. Per Cointeraux, infatti, la *preziosa arte del pisé rappresenta per una nazione illuminata un mezzo sicuro per far prosperare le campagne, il commercio e l'industria*. Il pisé, da sempre legato alla terra e all'edilizia rurale, era diventato, il simbolo di quell'innocenza politica che si opponeva alla corruzione dei palazzi e delle ville dell'aristocrazia¹⁵. Costruire in pisé

assumeva il significato di una scelta politica in un'epoca storica in cui agli edifici veniva attribuito un valore ideologico: mentre il vecchio ordine sociale si disgregava, la terra battuta, solida e duratura, rappresentava la capacità di ricostruire il nuovo tessuto della nazione sulla base dei principi repubblicani di equità e progresso.

Cointeraux si sforzò in tutti i modi di far conoscere e adottare le sue idee.

Nel 1785 Cointeraux si autodichiarò "professore di architettura rurale" e fondò scuole di agricoltura a Grenoble, Amiens, Lione e Parigi con l'obiettivo di istruire la classe operaia agricola¹⁶ sull'edificazione di abitazioni in terra dignitose, economiche e resistenti al fuoco.

Dotato di talento letterario e spirito divulgativo, l'architetto e muratore lionese seppe affermarsi anche nel panorama editoriale; a partire dal 1790, pubblicò, infatti, numerosi opuscoli e pamphlet, alcuni dei quali furono tradotti in ben sette lingue (tedesco, russo, danese, inglese, finlandese, italiano e portoghese). In un'epoca in cui la scrittura era appannaggio di pochi accademici, Cointeraux, con radici lontane dal mondo delle lettere, si ritagliò un posto d'onore tra i nuovi autori che rendevano accessibile la teoria architettonica a un pubblico vasto. Riuscì così a delineare un nuovo rapporto tra architettura e stampa, riconoscendo alle pubblicazioni la stessa rilevanza riservata alla progettazione e realizzazione degli edifici.

Nei cahiers o fascicoli dell'Ecole d'architecture rurale, Cointeraux promuoveva i vantaggi dell'architettura in terra battuta, cercando di abbattere i pregiudizi legati a questo materiale da costruzione. La maggior parte dei suoi lavori trattano temi come i muri in pisé, la prefabbricazione di mattoni in terra, la trasformazione dei torchi per il vino in strumenti di compressione per gli impasti fangosi, o le tecniche decorative per gli edifici costruiti in terra battuta¹⁷.

I suoi scritti attirarono l'attenzione di importanti architetti come Henry Holland¹⁸ (1745-1806) in Inghilterra, Thomas Jef-

erson¹⁹ (1743-1826) in America, David Gilly²⁰ (1748-1808) in Germania e Nicolai L'vov²¹ (1751-1803) in Russia, fondatore di una fiorente scuola di architettura in terra a Tiukhili vicino a Mosca, basata sulla scuola del Colisée di Cointeraux a Parigi. Attraverso le sue pubblicazioni, Cointeraux generò un interesse quasi universale per questo materiale, tanto economico quanto abbondante, e ne incoraggiò l'adattamento all'architettura rurale o residenziale.

Tuttavia, Cointeraux non riuscì mai a diffonderne ampiamente e in modo duraturo l'uso in Francia. Seppur se ne riconoscessero i requisiti abitativi, si rifiutava la terra battuta come materiale da costruzione adatto per qualsiasi classe sociale. In definitiva, le esigenze politiche e il linguaggio romanticizzante dell'élite metropolitana si sono allontanati dalle idee di Cointeraux perché erano incentrate prevalentemente sulle questioni pratiche del lavoratore agricolo.

Per queste ragioni il nouveau pisé rimase circoscritto soprattutto all'ambito rurale e alla regione natale dell'architetto in cui furono eretti case della classe media nella valle Saône a Lione, il municipio e la scuola elementare a Dolomieu di Isère, alloggi dei lavoratori, aziende agricole e cantine vinicole a Saint-Simeon-de-Bressieux.

Anche le numerose pubblicazioni non ottennero l'accoglienza attesa dalle istituzioni, poiché gli atteggiamenti sociali di Cointeraux erano in evidente disaccordo con la linea politica emersa durante il Direttorio e poi l'Impero. Lo stesso Napoleone, dopo avergli commissionato Napoléonville, nell'ovest della Francia, la criticò definendola una città di fango, e incolpò l'architetto di aver sprecato i mezzi a sua disposizione²².

Come costruttore, architetto, professore, inventore, scrittore, pubblicista e propagandista, François Cointeraux non ottenne perciò quel riconoscimento a lungo termine che sperava di ottenere per aver insegnato l'architettura e inventato una tecnica che ha contribuito al progresso dell'umanità. Quando morì a Parigi nel 1830, sembrava essere svanito nell'oscurità, ma le

idee che promosse con passione, convinzione e determinazione sono, in una prospettiva di storia sociale, un apporto importante allo sviluppo dell'arte del costruire. E sebbene il metodo da lui promosso non sia riuscito a trasformare i sogni utopici in azioni concrete, questo architetto è comunque rappresentativo di una cultura di invenzione e innovazione, altamente caratteristica della prima rivoluzione industriale e della nascita dell'architettura moderna. L'impegno per l'edilizia sostenibile, l'uguaglianza sociale e l'innovazione, hanno fatto di Cointeraux il precursore del cemento e il primo difensore di una costruzione alternativa, basata sull'utilizzo di un materiale libero e inesauribile.

Centocinquant'anni dopo Cointeraux, tra il 1940 e il 1970, l'egiziano Hassan Fathy (Alessandria d'Egitto, 1900 - Cairo, 1989) apportò un contributo significativo a questo rinascimento culturale, sociale e tecnologico. Nonostante le somiglianze, i due uomini provenivano da contesti molto diversi. Mentre Cointeraux era un autodidatta di origine rurale e operaia, Fathy proveniva da una famiglia di ricchi proprietari terrieri e ricevette un'educazione cosmopolita tipica della classe media araba. Studiò architettura presso la Scuola Politecnica del Cairo, che offriva una formazione modellata sulle pratiche europee contemporanee. Tuttavia, le carriere di Cointeraux e Fathy furono caratterizzate dal loro fervente sostegno a una forma molto specifica di modernizzazione: costruire con terra cruda. Entrambi erano convinti che il progresso passasse per la trasmissione delle loro conoscenze ad altri professionisti del settore. Cointeraux fondò scuole rurali per formare costruttori nella tecnica del "nouveau pisé", mentre Fathy creò un istituto tecnologico dedicato al recupero delle tecniche storiche del costruire in terra. Inoltre, diffusero le loro idee attraverso le loro opere scritte. Fathy pubblicò due libri riconosciuti oggi come classici. Il primo, *Building with the People, the Story of a Village in Egypt: Gouma*, fu pubblicato in francese nel 1970. Questo resoconto letterario raccontava le lotte di Fathy per convincere i suoi mecenati

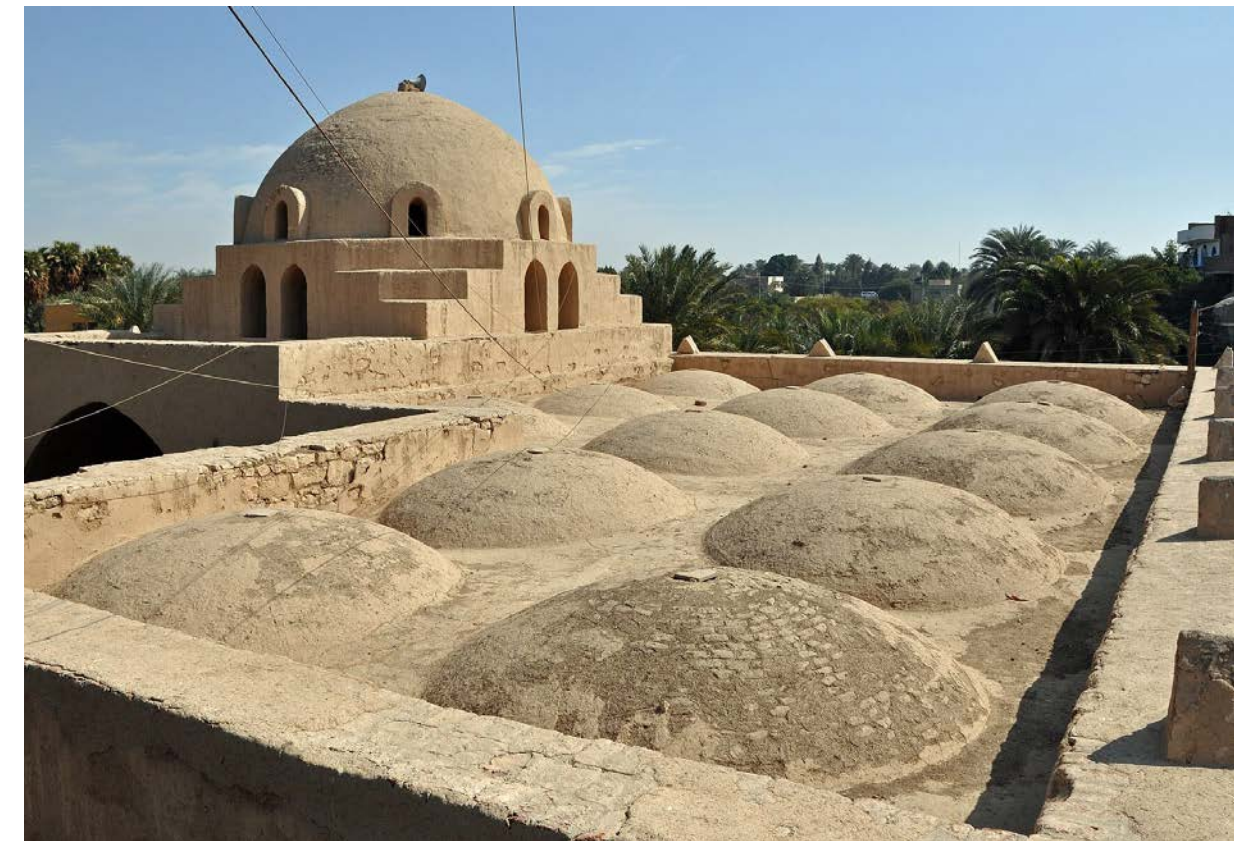
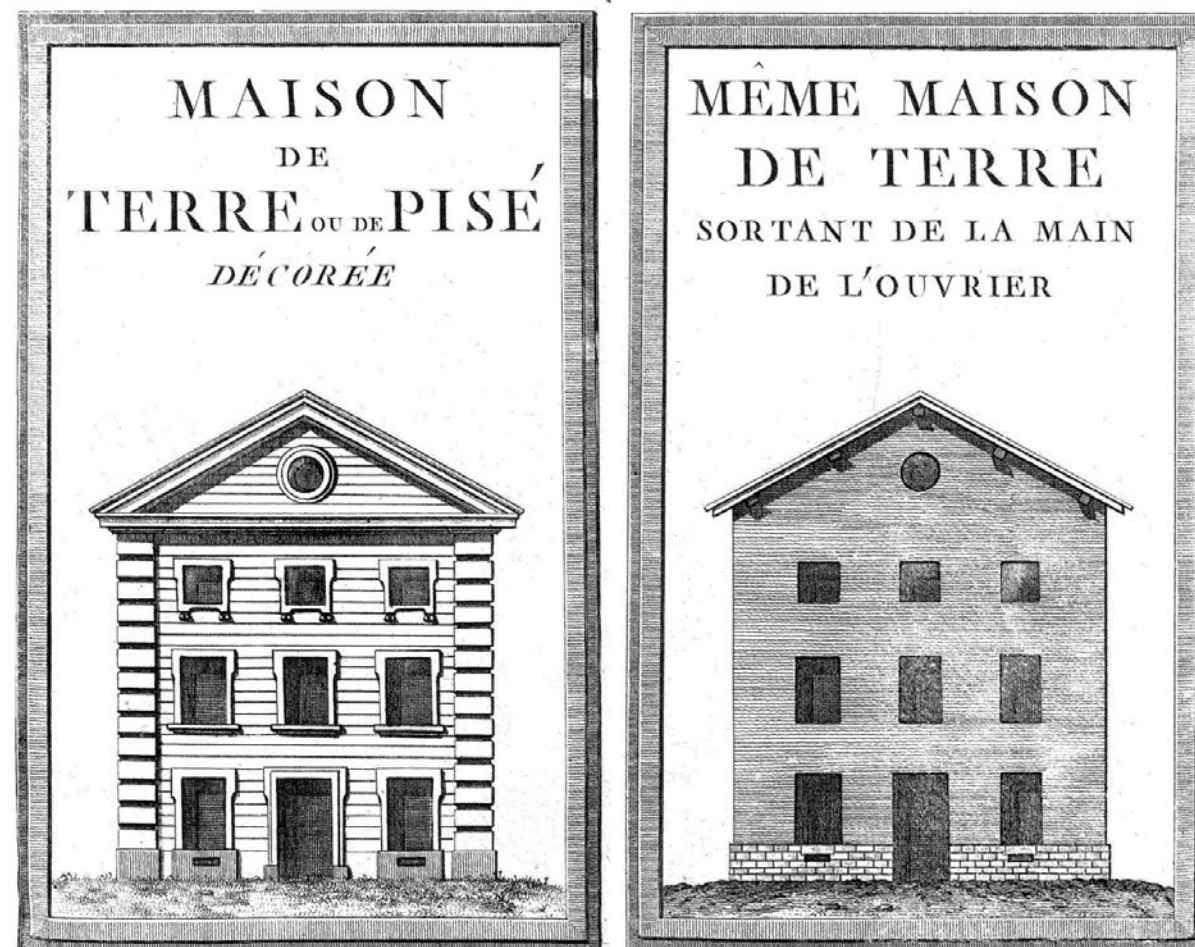
e clienti della validità della sua decisione di progettare e costruire questo nuovo insediamento con terra cruda. Il secondo libro, *Natural Energy and Vernacular Architecture* (1986), era un'opera più accademica, che rendeva omaggio all'architettura popolare dell'Egitto e del mondo arabo come modello efficiente di costruzione ecologica e protezione climatica per i suoi abitanti. Come Cointeraux prima di lui, Fathy ammirava l'intelligenza e l'armonia delle abitazioni rurali tradizionali che ispirarono il suo tentativo di razionalizzare queste antiche tecniche costruttive. Gli ultimi anni di vita di entrambi gli uomini furono segnati da riconoscimenti per la loro eccezionale creatività. Nel 1817, all'età di 77 anni, Cointeraux ricevette l'elogio di Jean-Baptiste Rondelet per l'invenzione del "nouveau pisé". Fathy, a 80 anni, vinse il prestigioso Premio Aga Khan per l'Architettura, che premia opere contemporanee che promuovono l'identità culturale del mondo musulmano. Nel discorso di accettazione, Fathy si concentrò su una questione che lo preoccupava particolarmente:

Come possiamo passare dal concetto attuale di architetto-costruttore alla pratica autosufficiente del costruttore-autodidatta? Un uomo solo non può costruire una casa, ma dieci uomini possono facilmente unirsi per costruirne dieci, o persino cento. Dobbiamo adattare le tecniche costruttive ai vincoli e alle esigenze economiche dei poveri.

Uno dei progetti più celebri di Fathy fu New Gurna, un villaggio vicino a Luxor, concepito per trasferire la comunità di Old Gurna, allora dedita al saccheggio di reperti archeologici. Realizzato tra il 1946 e il 1952, New Gurna rappresentò un esempio pionieristico di architettura sostenibile e partecipativa. Fathy coinvolse gli abitanti nella costruzione, istruiti sulle tecniche tradizionali, come la costruzione di volte nubiane senza centine e l'uso di mattoni crudi alleggeriti con paglia. Queste strategie non solo riducevano i co-

Alla pagina seguente:
Foto del villaggio di New
Gourna
© [https://
eartharchitecture.
org/?p=1138](https://eartharchitecture.org/?p=1138)

Frontespizi dell'École
d'architecture rurale di
Cointeraux (seconda
edizione, 1793). Facciata
di una "casa di una casa
di terra battuta decorata"
e della "stessa casa
ricavata dalle mani di un
operaio".
© [https://drawingmatter.
org/francois-cointeraux-
the-architect-of-the-
agricultural-proletariat/](https://drawingmatter.org/francois-cointeraux-the-architect-of-the-agricultural-proletariat/)



2.4 LA TERRA CRUDA NELL'ARCHITETTURA CONTEMPORANEA

La mostra *Città di Pietra*, curata dal prof. arch. Claudio D'Amato Guerrieri - fondatore della facoltà di architettura nel Politecnico di Bari, sezione della 10° Mostra Internazionale di Architettura alla Biennale di Venezia del 2006, diretta da Richard Burdett, si componeva di tre sezioni espositive. La prima intitolata *L'altra modernità* presentava illustrazioni della stagione d'oro dell'architettura muraria degli anni Trenta del secolo scorso. La mostra è dedicata alle città il cui principale carattere risiede nell'essere state pensate e costruite organicamente con la pietra.

Una mostra - afferma Claudio D'Amato Guerrieri - che nasce dalla convinzione che oggi esistono e sono ancora vitali alcuni ideali architettonici mediterranei, ma che rischiano di essere spazzati via. E' necessaria una forte coscienza critica per contrastare la minaccia derivante dai processi in atto di planetaria omologazione culturale.

L'esposizione solleva una serie di interrogativi sui modelli predominanti che guidano le attuali trasformazioni urbane e paesaggistiche, orientando sulle possibili alternative a un'architettura modernista, destrutturata, priva di memoria e scollegata dalla propria tradizione.

Città di Pietra mira a stimolare una riflessione critica su un tema ancora poco esplorato della ricerca: la possibile attualità di una cultura muraria. Questa non viene intesa solo come continuità con le tecniche costruttive tradizionali, ma anche come un loro profondo rinnovamento.

Seguendo il pensiero critico di D'Amato e migrando la riflessione dal materiale pietra al materiale terra, la sezione che segue mette assieme una serie di architetture che lasciano emergere un esercizio del progetto le cui forme sono intimamente

connesse alle qualità intrinseche del materiale attraverso cui l'architetto opera ed alle relative tecniche costruttive che rimangono tali a quelle con cui sono stati costruiti i contesti più antichi. Massività, plasticità e approccio organico alle forme emergono dal naturale impiego di un materiale che, come la pietra, è vocato per un'architettura plastico muraria.

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Villaggio Dar al-Islam

Abiquiu, USA

1980

Hassan Fathy

In questo villaggio, pensato per una nuova comunità di famiglie musulmane presenti in questo luogo, l'architetto egiziano ha potuto applicare la tecnica della costruzione di volte e cupole in adobe. In particolare la moschea, costruita grazie alla manodopera del suo team giunto negli USA appositamente per il progetto, è stato il primo edificio realizzato del villaggio ed è situato al centro della piazza principale. Costruita interamente in adobe, presenta un impianto quadrato, con grandi muri portanti che reggono gli archi e cupole che coprono l'aula della preghiera.

Alla pagina successiva: ►►
Foto del villaggio Dar al-Islam
© <https://www.famagazine.it/index.php/famagazine/article/view/230/934>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Casa in terra battuta

l'Isle-d'Abeau, Francia

1984

Jourda & Perraudin Partenaires

Nel 1980 il Centre Pompidou di Parigi ha organizzato una mostra sulle tecniche di costruzione in terra sia tradizionali che moderne. Il grande successo ha portato il Centre Pompidou a bandire un concorso per la costruzione di una nuova città interamente in terra. In particolare, si creò una partnership con L'Isle-d'Abeau, comune limitrofo, che prevedeva la costruzione di settantadue case per un complesso residenziale sperimentale chiamato *Domaine de la terre*. Dieci gruppi di architetti, selezionati con un concorso, hanno collaborato con i tecnici del centro CRATerre per lo sviluppo e l'applicazione della terra cruda nei loro progetti, in particolare con la tecnica del Pisè. Tra questi, degno di nota, è il progetto di F. Joura e G. Perraudin che consiste in due unità abitative bifamiliari su tre piani. Le pareti realizzate con la tecnica del pisè presentano un sottile strato orizzontale di cemento, utile a conferire sia ritmo alla facciata che maggiore stabilità agli strati sottostanti.

L'accostamento tra tradizionale e moderno è presente anche nel tetto, costruito in policarbonato traslucido e sostenuto da capriate in acciaio e colonne in cemento. A differenza dei tradizionali edifici in terra battuta, le cui pareti sopportano il carico del tetto, qui il tetto, è reso quasi invisibile accanto alle massicce mura.

Alla pagina seguente: ►►
Foto del complesso
Domaine de la terre
© [https://
eartharchitecture.
org/?p=318](https://eartharchitecture.org/?p=318)

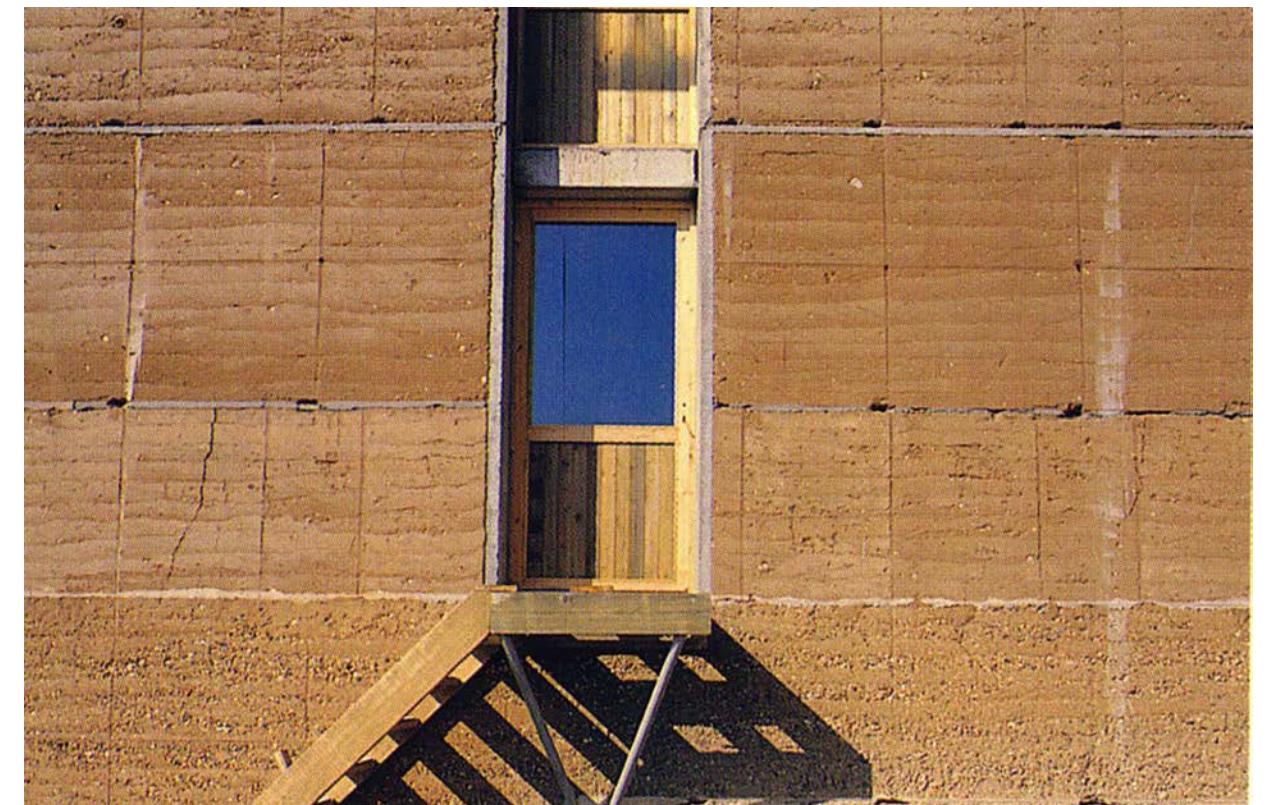
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Casa Mathies

Rankweil, Austria

1996

Robert Felber, Martin Rauch

Il progetto di casa Mathies in Austria ha previsto che la terra, materiale di scavo del cantiere, fosse utilizzata, attraverso la tecnica del pisè, per realizzare le pareti esterne della casa, spesse 63 cm. Situate sopra delle fondazioni in cemento armato, le pareti in terra sono state lasciate allo stato naturale sia internamente che esternamente, senza intonaco.

Sulla sommità delle pareti, interrotte da ampie vetrate, è posto il primo piano realizzato attraverso una struttura in legno. Il materiale di scavo infine è stato utilizzato anche come materiale di riempimento per il soffitto e per dei dettagli di finitura.

Alla pagina seguente: ►►
Foto di Casa Mathies
© <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=14>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Casa Catalina

Tucson, Arizona

1998

Rick Joy Architects

La Catalina House, abitazione realizzata in un contesto ostile come quello del deserto dell'Arizona, racchiude in sé forme espressive e dinamiche che tendono tuttavia a mimetizzarsi con l'ambiente circostante. Situata a sette metri al di sotto del livello stradale, è composta da due volumi rettangolari in terra battuta, con la tecnica del pisè, che definiscono gli spazi pubblici e privati. Essi si incontrano in un punto che genera l'ingresso principale della casa.

Gli spazi interni si proiettano in quelli esterni grazie ad un patio coperto di oltre 150 metri quadri racchiuso da muri in terra e attraverso grandi pareti in vetro a due strati, specificamente sviluppato per il duro ambiente desertico. Vi è così un contrasto materico dato dalla leggerezza del vetro e dalla massività delle pareti in terra. Tre diversi terreni locali sono stati utilizzati nella miscela di terra battuta, ciascuno con diverse quantità di argilla, sabbia e ghiaia e miscelate con cemento Portland e ossido di ferro pigmentato per ottenere la resistenza all'erosione, l'integrità strutturale e il colore desiderati. Il progetto presenta inoltre una fondazione in cemento armato e un tetto a capanna rovesciata.

Alla pagina seguente: ►►
Foto di Casa Catalina
© <https://studiorickjoy.com/work/catalina-house/>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Cappella della Riconciliazione

Berlino, Germania

2000

Reitermann and Sassenroth

Il luogo su cui sorge la chiesa è un terreno simbolo della storia dell'ultimo secolo della Germania. Qui sorgeva una chiesa neo-gotica in mattoni, consacrata nel 1894, che fu distrutta nel 1985 tramite esplosivi perché situata in un punto particolare vicino al muro di Berlino che rendeva difficili le rotte di pattuglia. In seguito alla caduta del muro il terreno è rimasto abbandonato per anni, fino a quando la comunità non decise di attuare un nuovo piano per la commemorazione e R. Reitermann e P. Sassenroth, due giovani architetti berlinesi, ebbero l'incarico di progettare la nuova Cappella della Riconciliazione sul sito della chiesa precedente. La prima proposta prevedeva cemento e vetro, ma la comunità considerava questi materiali rappresentativi del muro opprimente che aveva diviso le loro città e in alternativa selezionava legno e terra. La cappella è stata il primo edificio religioso in terra portante in Germania e la prima struttura pubblica in terra battuta in 150 anni. Mattoni, piastrelle e chiodi, tutti i resti della chiesa precedente, sono incorporati nei muri e visibili sulla loro superficie, preservando così la tumultuosa storia del sito. Il nucleo dell'edificio è composto da una stanza ovoidale in terra battuta con orientamento est-ovest. Il nuovo altare in terra battuta si trova in cima al refettorio in pietra della chiesa originale ed è incassato nel pavimento. Un recinto di lamelle verticali in legno racchiude l'intera struttura in terra battuta, consentendo il passaggio regolato di luce e aria.

Alla pagina seguente: ►►
Foto della Cappella della
Riconciliazione
© <https://spazioibrido.blogspot.com/2017/03/storia-di-un-edificio-in-terra-battuta.html>

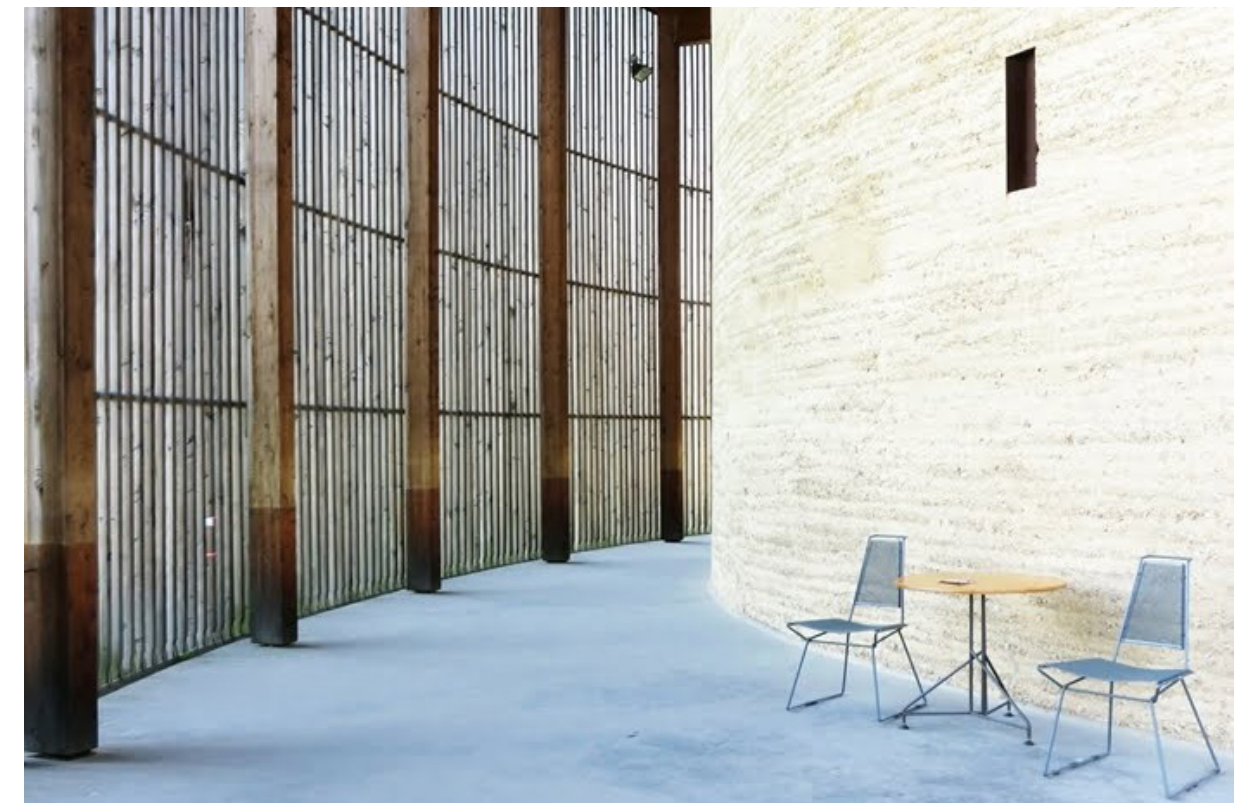
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Vineyard Residence

Victoria, Australia

2002

John Wardle Architects

Il Vineyard Residence è una residenza privata di oltre 1300 metri quadrati realizzata adiacente ad un vigneto e immersa nel paesaggio naturale australiano. Costruita in terra battuta con la tecnica del pisè e con travi di legno a vista per evocare le qualità materiche di un tradizionale casale con vigneto. Il prospetto nord della casa è situato parallelamente ai filari del pergolato d'uva mentre la veranda è coperta da una struttura lignea che proietta l'ombra anche oltre la casa e fino al vigneto, stabilendo un collegamento visivo tra la casa e il terreno circostante.

La casa è divisa in due parti, una privata e una per gli ospiti ed è delimitata da muri in terra battuta rastremati; per questi è stata utilizzata terra prelevata da una cava limitrofa, al quale è stato aggiunto del granito frantumato insieme ad una piccola quantità di cemento come stabilizzante e un idrorepellente specifico per le strutture in terra, al fine di migliorarne la resistenza alle intemperie.

Alla pagina seguente: ►►
Foto del Vineyard
Residence
© <https://spazioibrido.blogspot.com/2017/03/storia-di-un-edificio-in-terra-battuta.html>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

METI School

Rudrapur, Bangladesh

2005

Heringer-Roswag Cooperation

Il progetto consiste in una scuola interamente realizzata dalla comunità senza l'ausilio di macchinari, reso possibile dalla capacità del team di architetti di migliorare la cultura tradizionale costruttiva con la tecnica del bauge. Solitamente gli edifici in Bangladesh venivano costruiti direttamente sul terreno, invece in questo progetto è stata realizzata una fondazione in mattoni per separare il terreno umido dai muri di terra. Il piano terra ha muri spessi in terra mentre il primo piano è costruito con una struttura in bamboo chiaro contenente due grandi stanze. La facciata è rivestita da telai di legno con listelli di bamboo, il tutto ancorato alle pareti di terra sottostanti.

L'interno presenta spazi intimi, organici e tattili in cui i bambini possono studiare, incontrarsi in gruppi e giocare.

Alla pagina seguente: ►►
Foto della METI school
© <https://www.anna-heringer.com/projects/meti-school-bangladesh/>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Nk'Mip Desert Interpretive Centre

Osoyoos, Canada

2006

Hotson Bakker Boniface Haden

Il Nk'Mip Desert Interpretive Center è il primo di numerosi edifici culturali dei nativi americani nella Columbia Britannica che intendono utilizzare questo genere di architettura per trasmettere la storia e promuovere la cultura nativa. Diventato ben presto centro focale della comunità, l'edificio presenta alcuni muri realizzati in cemento e altri in terra battuta e tra questi vi è anche il più grande muro in pisè del Nord America, con una lunghezza di 80 metri, un'altezza di 5,4 metri ed uno spessore di 0,60 metri.

E' stato costruito utilizzando terre locali con l'aggiunta di cemento e additivi coloranti al fine di evidenziare strati di terra che evocassero la sedimentazione geologica.

A differenza della tecnica solita che prevede un'unica massa solida, questo muro è composto da due strati di terra al cui interno vi è uno strato isolante, che ne migliorano le prestazioni termiche.

La sostenibilità, tema principale del progetto, ha avuto anche risvolti sociali, in quanto i membri della comunità hanno partecipato al processo costruttivo, imparando la tecnica del pisè. Il rapporto tra ambiente ed edificio è sottolineato infine dalla presenza di un tetto verde su cui si sono stabilizzate specie autoctone di piante, rendendolo sempre più parte dell'ambiente circostante.

Alla pagina seguente: ►►
Foto del Nk'Mip Desert
Interpretive Center
© [https://
eartharchitecture.
org/?p=274](https://eartharchitecture.org/?p=274)

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Casa Rauch

Schlins, Austria

2008

Roger Boltshauser, Martin Rauch

Posizionata su una ripida collina del villaggio di Schlins, in Austria, la casa si configura come una struttura monolitica che si relaziona con il suo contesto paesaggistico. Il desiderio di costruire la casa con materiali naturali ed ecologici si traduce nei progettisti con la scelta di muri in terra battuta, realizzati con la tecnica del pisè.

Le pareti sono state compresse nella cassaforma con pistoni e rulli pneumatici e hanno uno spessore di 45 centimetri e non sono trattate.

Tutti i muri a livello del suolo sono sigillati all'esterno con fogli bituminosi. La scala alta 10 m è realizzata all'interno e all'esterno da muri di terra battuta ed è esposta alla luce di una cupola di vetro. I gradini realizzati in terriccio da scavo misto a calce tufacea hanno uno spessore di 9 centimetri, molati e fissati su un lato al muro esterno.

La casa è il risultato della convinzione che con materiali da costruzione naturali e una buona esperienza manuale, possono essere generati involucri di alta qualità.

Alla pagina seguente: ►►
Foto della Casa Rauch
© Beat Bühler

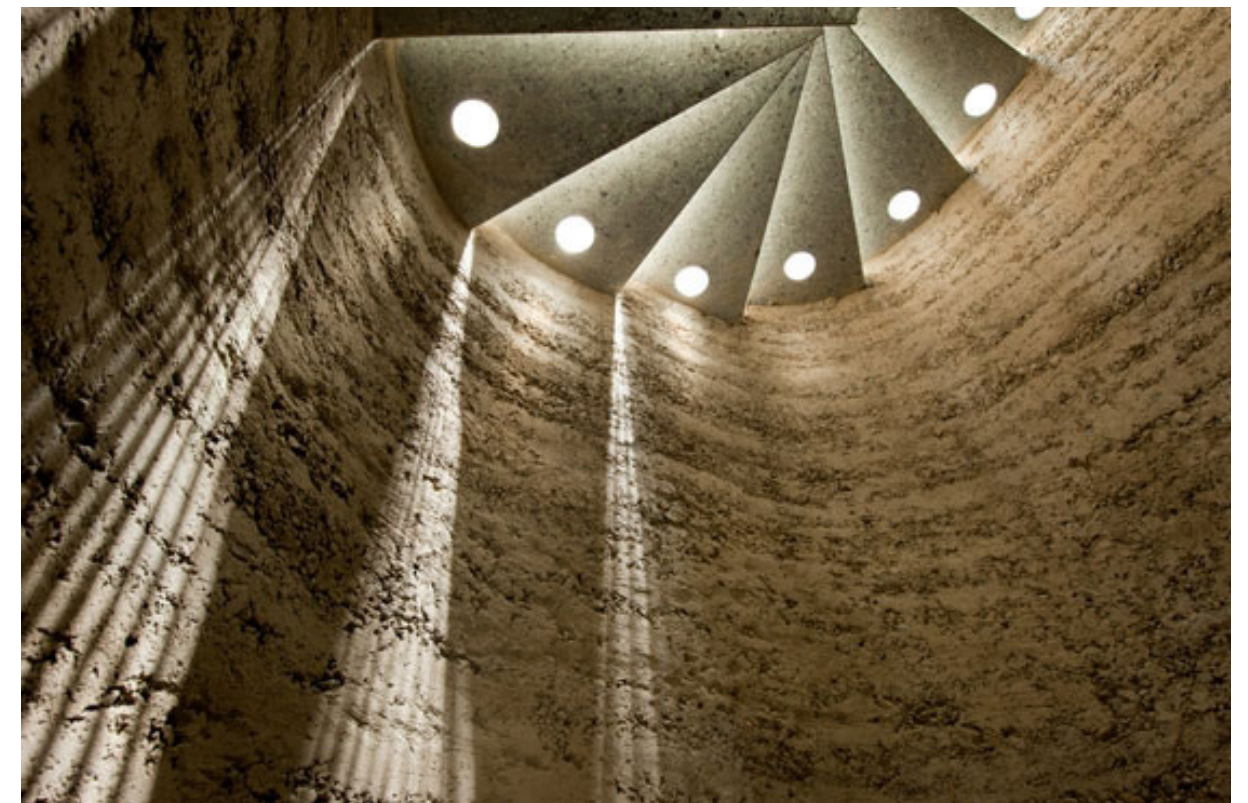
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Centro Ricola Herb

Laufen (Basel), Svizzera

2012

Herzog & de Meuron

In un paesaggio punteggiato da edifici industriali convenzionali sventa il Centro Ricola, un impianto di lavorazione delle erbe costruito in gran parte con terra di provenienza locale.

L'ingresso per la consegna e le sezioni del magazzino presentano facciate monolitiche, composte da filari di blocchi di terra battuta, elementi prefabbricati realizzati in una vicina fabbrica con materie prime prese da cave locali. Per attenuare l'erosione causata da vento e pioggia è stata utilizzata una malta ottenuta mescolando tufo vulcanico con calce.

La facciata è autoportante e semplicemente vincolata alla struttura portante in calcestruzzo armato e vede la presenza di grandi finestre rotonde per illuminare gli ambienti interni.

Alla pagina seguente: ►►
Foto del Centro Ricola
Herb
© [https://www.
herzogdemeuron.com/
projects/369-ricola-
krauterzentrum/](https://www.herzogdemeuron.com/projects/369-ricola-krauterzentrum/)

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano
Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Stazione ornitologica Svizzera (centro visitatori)

Sempach, Svizzera

2014

MLZD Architekten, Martin Rauch

Posizionato sulle rive del lago di Sempach, il nuovo centro è stato progettato con forme compatte che si integrassero con il paesaggio circostante.

Tra i due edifici principali vi è uno spazio che diventa di fatto il foyer, distribuendo l'accesso ai vari ambienti della mostra. Le pareti verticali sono composte da elementi prefabbricati in terra battuta, spessi 35 centimetri per il vivaio e 45 centimetri per le zone adibite alla mostra; sono portanti e si trovano davanti ad una struttura in cemento armato.

Gli infissi e le finestre realizzati in acciaio Corten sono ancorati negli elementi in terra battuta.

Alla pagina seguente: ►►
Foto della stazione
ornitologica svizzera
© [https://www.
lehmtonerde.at/
en/projects/project.
php?plD=95](https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=95)

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano
Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Cupola in terra

ETH Zürich, Switzerland

2014

ETH Zürich- Martin Rauch

La realizzazione di questa cupola in terra rappresenta il risultato di uno studio sviluppato dall'università ETH di Zurigo, che ha visto la collaborazione con Martin Rauch.

La cupola è stata costruita con elementi prefabbricati in terra battuta che fornisce un rifugio per il relax in estate e offre nuove intuizioni sulla stabilità delle strutture in terra. Alto 5 metri, il padiglione è composta da sei archi e da sei cupole che si aprono verso l'esterno.

Alla pagina seguente: ►►
Foto della cupola in terra
© <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=113>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

La Grande Muraglia

Perth, Australia

2015

Luigi Rosselli

Lungo 230 metri, il muro di terra battuta serpeggia lungo il bordo di una duna di sabbia e racchiude dodici residenze ricoperte di terra, create per fornire alloggi a breve termine per una stazione di bestiame durante la stagione del raduno. Con la loro facciata in terra battuta spessa 45 centimetri e la duna di sabbia sul retro che forma i tetti, le residenze hanno la migliore massa termica disponibile, rendendole naturalmente fresche nel clima subtropicale.

I materiali scelti sono quelli locali che richiamano il paesaggio circostante integrandosi alla perfezione con il territorio. In alto, sulla duna sabbiosa, come a voler troneggiare e controllare l'intero muro, troviamo un padiglione, fulcro multifunzionale.

La particolare forma ondulata della costruzione consente la creazione di una veranda di pertinenza di ogni elemento residenziale.

Alla pagina seguente: ►►

Foto della Grande Muraglia

© https://www.domusweb.it/it/architettura/2015/08/05/luigi_rosselli_the_great_wall_of_wa.html

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Torre di osservazione

Negenoord

Dilsen-Stokkem, Belgio

2016

De Gouden Liniaal Architecten

L'edificio consiste in una torre di osservazione su una piccola collina, situata al centro dell'area e creata per proteggere la torre dalle inondazioni invernali.

Realizzato con i materiali locali come terra, argilla e ghiaia, le pareti esterne sono in terra battuta. All'interno, un nucleo centrale con scale è realizzato in cemento, sabbiato per mostrare anche la ghiaia. Attraverso la sua materializzazione, l'edificio ci racconta il luogo in cui è stato costruito e diventa fortemente ancorato al suo ambiente.

La salita alla vetta è concepita in diverse sequenze: su ciascuno dei pianerottoli delle prime 3 scale si apre una visuale diversa sull'ambiente; la forma triangolare e la posizione degli angoli tagliati è stata determinata da queste viste.

Alla pagina seguente: ►►

Foto della Torre di osservazione

© <https://www.archdaily.com/871476/observation-tower-negenoord-de-gouden-liniaal-architecten>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Museo Goldkammer

Frankfurt am Main, Germania

2019

HG Merz gmbH, Martin Rauch

Inaugurato nel maggio 2019, è un museo sotterraneo dedicato all'oro e alla storia di questo prezioso materiale. Tra gli elementi protagonisti dei tunnel espositivi spiccano le pareti in terra battuta che conferiscono matericità all'ambiente, restituendo l'idea concettuale della miniera, accompagnando il visitatore lungo un percorso espositivo reso suggestivo da scelte materiche e compositive differenti, per offrire inediti spunti narrativi. Tra questi sicuramente l'uso sapiente delle luci e delle trasparenze in contrasto con le pareti in terra e i manufatti in oro.

Alla pagina seguente: ►►
Foto del Museo
Goldkammer
© <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=103>

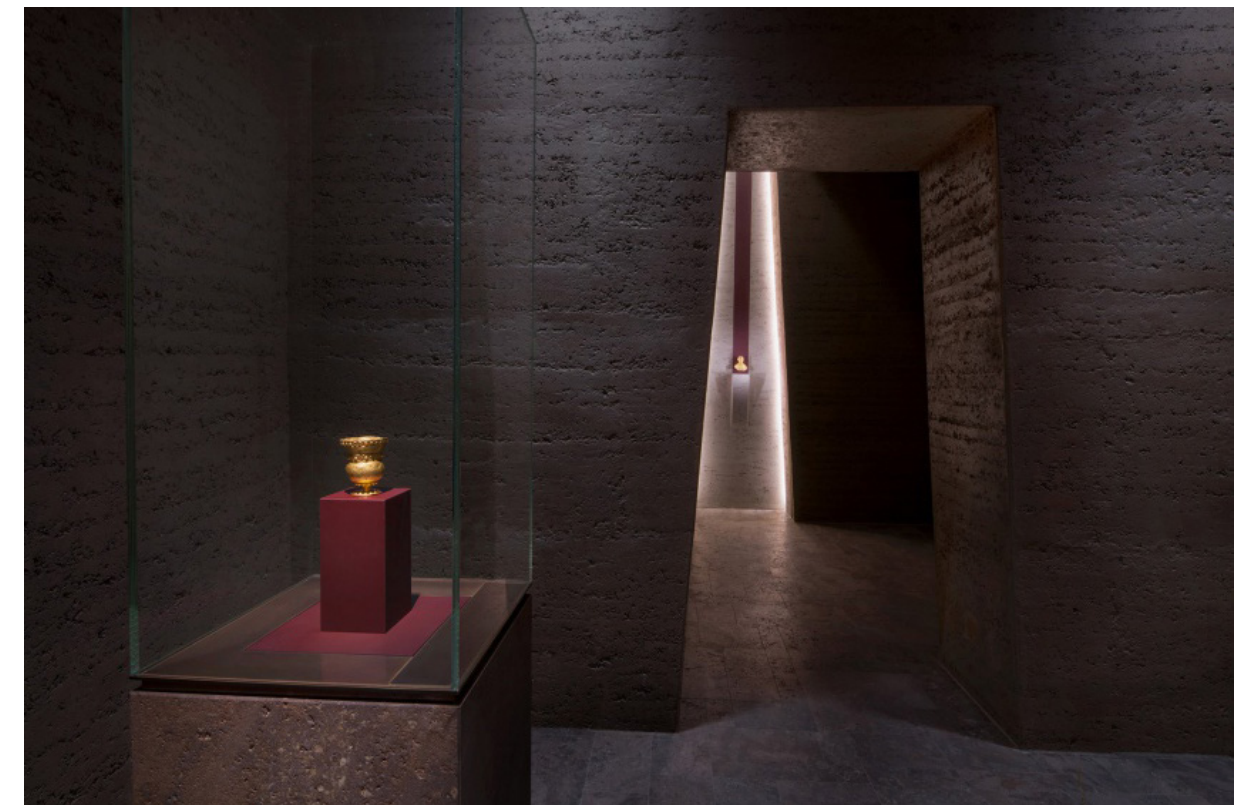
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Ospedale Bayalpata

Achham, Nepal

2019

Sharon Davis Design

Il Bayalpata Hospital è un complesso medico ad Achham, in Nepal, costruito in terra battuta composto da cinque edifici medici e un blocco amministrativo.

La scelta di utilizzare materiali locali è stata una necessità dovuta alla posizione molto remota di questo luogo, che ha permesso una realizzazione anche più economica e sostenibile.

Per i muri, il terreno del sito è stato impastato con una piccola quantità di cemento per rendere la struttura più durevole e in grado di resistere alla frequente attività sismica della zona. All'interno degli edifici principali, alte finestre incorniciano le viste delle colline terrazzate e le vetrate a lucernario portano la luce naturale negli ambienti.

La cassaforma in plastica riutilizzabile ha facilitato la costruzione più rapida e l'impiego di manodopera locale non qualificata, mentre la pietra locale è stata utilizzata per fondazioni, percorsi e muri di sostegno.

Alla pagina seguente: ►►
Foto dell'ospedale
Bayalpata
© <https://archello.com/it/project/bayalpata-hospital>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Osservatorio Landroom

Negev desert, Israele

2020

Gitai Architects

L'idea dei progettisti è stata quella di realizzare un piccolo luogo nel deserto che fungesse, la mattina, da riparo dal sole e, la sera, da osservatorio.

La struttura misura appena 6 metri quadri e può ospitare solo due persone. L'edificio quadrato ha un interno circolare e un'apertura rivolta verso il deserto, oltre a un sedile incorporato dove i viaggiatori possono riposare.

Non ha tetto ma è invece aperto all'aria del deserto per offrire ai visitatori una vista del cielo notturno incorniciato dalle sue pareti di terra. Il progetto è stato costruito interamente con la terra e la sabbia del cratere Ramon, così come le pietre trovate nel sito. Il processo di costruzione è quello tipico della tecnica del pisè, ovvero è stato eseguito comprimendo gli strati di terreno in uno stampo creato appositamente. In questo modo si è formata una stratificazione visiva materica, generando una relazione tra spazio materiale e territorio circostante.

Alla pagina seguente: ►►
Foto dell'osservatorio
Landroom
© <https://www.archdaily.com/946160/landroom-observatory-pavilion-gitai-architects>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Presenza in Hormuz 02

Hormuz island, Iran

2020

ZAV architects

Il progetto di questo villaggio è situato presso l'isola di Hormuz, nel Golfo Persico, luogo di straordinari paesaggi colorati surreali ma allo stesso tempo politicamente strategico.

Consiste in un'aggregazione di case cupolate su piccola scala realizzate con la tecnica del Superadobe di Nader Khalili, attraverso ovvero l'uso di sacchi contenenti terra battuta e sabbia.

La forma cupolata riprende strutture molto diffuse nella regione e si adatta staticamente alla costruzione con questa tecnica. La loro piccola scala li rende compatibili con le capacità costruttive degli artigiani locali e dei lavoratori non qualificati.

Il villaggio appare quindi come un infinito insieme di particelle colorate, quasi ad interpretare la volontà di cambiamento della comunità. Infatti, questo progetto ha come obiettivo quello di generare un cambiamento sociale, dettato dai vantaggi apportati al cliente, ovvero destinando una quota maggiore del budget ai lavoratori piuttosto che ai materiali importati, responsabilizzando la popolazione e fornendo ai lavoratori le abilità di costruzione spendibili in altri progetti.

Alla pagina seguente: ►►
Foto del villaggio
sull'isola di Hormuz
© <https://zavarchitects.com/works/PRESENCE-IN-HORMOZ-02>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Note

- 1** La classificazione elaborata da CRAterre intendeva, oltre definire i vari procedimenti costruttivi, promuovere la terra cruda come alternativa sostenibile e versatile, capace di soddisfare le esigenze contemporanee, nel rispetto delle peculiari tradizioni locali.
- 2** Negli Usa il termine adobe viene usato per indicare qualsiasi tipo di struttura eretta in terra cruda.
- 3** Tracce di queste trasformazioni formali sono riscontrabili nella tradizione costruttiva vernacolare di alcune zone dell'Africa. Ad esempio, nelle architetture hausa della Nigeria settentrionale, a partire dal XIII sec., sono ampiamente utilizzati i tubali, mattoni di laterite rossa a forma di pera. Invece, in Mali sono stati impiegati fino agli anni '30 del XX sec. i Djenné-ferey, un'antica tipologia di mattoni autoctona della città di Djenné, che hanno forma cilindrica, sono modellati a mano e vengono messi in opera allo stato semifluido.
- 4** A seconda del tipo di forme adottate, possono essere prodotti da 1 fino a 16 mattoni contemporaneamente. Nei mercati sahariani vengono vendute forme in legno per la produzione simultanea di 2 o 4 adobe e questi strumenti sono i più diffusi almeno nelle zone caldo-aride dell'Africa.
- 5** La pressa prende il nome da Cinva, la cooperativa di ingegneri colombiani che ha collaborato alla progettazione, e da Ram, meccanismo di compressione manuale, simile ad un ariete, utilizzato per comprimere la terra e dar forma ai mattoni.
- 6** La resistenza all'acqua di questi elementi non è però ottimale, seppur estremamente migliorata rispetto a quella di un normale mattone non pressato che inizia a disgregarsi già alle prime piogge. Vengono, pertanto, applicate alle murature costruite con questi elementi vernici idrorepellenti in grado di impermeabilizzare le superfici.
- 7** Il quartiere terra dell'Isle d'Abeau nei pressi di Lione mostra le varie possibilità di impiego offerte dal pisé stabilizzato nei paesi industrializzati per la costruzione di edifici privati e pubblici.
- 8** La compattazione è un'operazione necessaria per eliminare le sacche d'aria all'interno della muratura e assicurare adesione tra i livelli.
- 9** Talvolta si interpone tra uno strato e l'altro della paglia asciutta.
- 10** Il torchis è stato ampiamente usato in Europa dai tempi dei Romani fino al Rinascimento ed era noto come "tecnica a graticcio". Esempi rurali e urbani costruiti con questo procedimento costruttivo sono presenti in Francia (specialmente in Normandia, Piccardia, Alsazia e Champagne), Bretagna, Germania, Belgio; Olanda e Scandinavia così come in Africa e America Latina.
- 11** Questa tecnica è alla base delle tradizionali Fachwerkhaus tedesche, nelle quali oltre che per realizzare le strutture verticali, è impiegata anche in solai e rivestimenti interni delle coperture
- 12** La distinzione tra le due tecniche è la stessa che intercorre tra il colombage e il pan de bois: il wattle and daub usa un traliccio di rami di legno intrecciati come base per il riempimento, mentre il mud and stud si affida ai montanti verticali in legno.
- 13** Nel 1810, ad esempio, Toussaint scriveva nel suo trattato di geometria e architettura: "L'architettura è dopo l'agricoltura la prima e la più utile delle arti".
- 14** Le tecniche di costruzione in terra promosse da Cointeraux furono riprese nel 1817 da Jean-Baptiste Rondelet nel suo Traité théorique et pratique de l'art de bâtir, che da allora in poi diede loro un'importante e duratura esposizione nel principale libro tecnico di architettura della prima metà del XIX secolo.

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

- 15** Già nel 1750, il filosofo Jean-Jacques Rousseau, nel suo Primo discorso sulle arti e le scienze, scriveva: "Abbattete questi anfiteatri, rompete questi marmi!". I rivoluzionari raccolsero il suo appello, e nel 1792 l'Assemblea nazionale dichiarò: "guerra alla casa padronale, pace alla ca-panna!". Questo messaggio era un'esortazione a ricostruire la Francia su basi nuove, più umili e patriottiche.
- 16** Nel suo sforzo continuo di rendere la terra una fonte duratura e sostenibile di benessere collettivo, Cointeraux arrivò persino ad insegnare ai suoi allievi come trasformare la stessa in cibo.
- 17** L'intera opera di François Cointeraux potrebbe intitolarsi L'arte di costruire nei campi o, meglio ancora, L'agricoltura considerata come una delle belle arti. Infatti, l'interesse di Cointeraux si estese progressivamente all'intero settore agricolo, dalla coltivazione dei campi, alla lavorazione del legno e dell'argilla fino al miglioramento di aziende agricole, ovili, fagianerie, conigliere e fabbriche di campagna. Il suo vasto curriculum includeva anche temi legati all'organizzazione degli spazi domestici rurali, come evidenziato nell'opera La Cuisine Reversée ou le Nouveau Ménage del 1796, o nel convegno del 1811 Il bracciante a suo agio o l'arte di incorporare i mobili nell'edificio.
- 18** In Inghilterra Henry Holland, un architetto neoclassico popolare tra l'aristocrazia, tradusse le opere di Cointeraux in inglese, diffondendo così le sue idee in Gran Bretagna e in America.
- 19** Nel 1793, David Gilly, architetto alla corte di Federico II in Germania, aprì la Bauschule, una scuola di costruzione a Berlino, che si rifaceva alle scuole francesi fondate da Cointeraux. Cinque anni dopo, Gilly costruì Palazzo Kleinmachnow vicino Berlino in terra battuta, e sponsorizzò anche una traduzione degli scritti di Cointeraux. Questi, a loro volta, impressionarono a tal punto l'impresario Wilhelm Jacob Wimpf, che nel 1826 eresse un blocco di appartamenti borghesi a Weilburg: con i suoi 7 piani di altezza, questo che era il più alto edificio tedesco in terra battuta e rivaleggiava con le controparti francesi di Lione.
- 20** Nel 1792, dopo aver visitato una delle case costruite da Cointeraux vicino Lione, Jefferson scrisse al presidente degli Stati Uniti, George Washington, per riferirgli sugli edifici in pisé de terre che aveva visto in Francia e dei potenziali vantaggi che questa tecnica avrebbe avuto per i nuovi villaggi del West.
- 21** Nikolai L'vov, architetto favorito dallo zar Paul I, aveva tradotto i lavori di Cointeraux in russo nel 1796. L'vov mise in pratica le idee francesi nei suoi primi edifici residenziali, inclusa la sua casa a Torjok. Dopo che L'vov ebbe cantato le lodi della terra battuta a corte, lo zar gli commissionò la costruzione di alcune caserme e del prestigioso Palazzo del Priore di Gatchina. Entusiasta dei risultati, lo zar aiutò L'vov a fondare anche due scuole che avrebbero formato centinaia di russi a lavorare con il nuovo pisé secondo i principi di Cointeraux.
- 22** L'ascesa al potere di Napoleone rifletteva un cambiamento ideologico che si allontanava dalla promozione dell'agricoltura e si dirigeva verso la conquista militare. Così, nel 1806 Cointeraux fu contattato da Emmanuel Crétet, il direttore generale di Ponti e Strade, che voleva usare la tecnica del nouveau pisé per costruire caserme militari a Napoléonville, sperando di sfruttare la forza, l'accessibilità e la convenienza della terra battuta. Questo contraddiceva, però, la visione di Cointeraux di riconciliare umanità e natura, così come il suo idealismo incentrato sui valori agrari.

3 LA MANIFATTURA ADDITIVA: nuova frontiera tecnica nel progetto e nella costruzione dell'architettura in terra cruda

3.1 LA MANIFATTURA ADDITIVA COME PROCESSO COSTRUTTIVO

Negli ultimi anni, la riscoperta dell'uso della terra cruda è stata favorita dalla sempre maggiore attenzione ai temi di sostenibilità ambientale, dalle sue proprietà estetiche e isolanti. L'introduzione della Manifattura Additiva ha aperto nuove prospettive per portare la costruzione con terra cruda a un livello più avanzato di innovazione tecnologica. È utile quindi analizzare la tecnologia e le prospettive di innovazione che offre nel settore delle costruzioni.

Per chiarire l'ambiguità e la confusione presente anche all'interno della letteratura scientifica in termini di vocaboli utilizzati per descrivere la tecnologia, le sue applicazioni e sperimentazioni, si introduce la normativa UNI EN ISO/ASTM 52900 aggiornata al 2022¹.

Il termine stampa 3D è un termine che potremmo definire giornalistico e gergale. Il termine scientifico da utilizzare per descrivere la tecnologia è Manifattura Additiva. La normativa definisce la Manifattura Additiva come il "processo di unione di materiali per la realizzazione di parti a partire da dati di modelli 3D, di solito layer (strato) su layer, in contrapposizione alle metodologie di produzione sottrattiva e formativa"².

Nel capitolo tre della normativa vengono indicati i termini e le definizioni delle categorie di processo di seguito riportate³:

BINDER JETTING, BJT

processo di manifattura additiva in cui un agente legante liquido viene depositato selettivamente per unire materiali in polvere.

DIRECTED ENERGY DEPOSITION, DED

processo di manifattura additiva in cui l'energia termica focalizzata viene utilizzata per fondere i materiali mentre vengono depositati.

Nota 1 alla voce: "Energia termica focalizzata" significa che una fonte di energia (ad esempio laser, fascio di elettroni o arco di

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

plasma) viene focalizzata per fondere i materiali da depositare.

MATERIAL EXTRUSION, MEX

processo di manifattura additiva in cui il materiale viene erogato selettivamente attraverso un ugello o un orifizio.

MATERIAL JETTING, MJT

processo di manifattura additiva in cui gocce di materiale di base vengono depositate selettivamente.

Nota 1 alla voce: Tra i materiali di base per il Material Jetting vi sono la resina fotopolimerica e la cera.

POWDER BED FUSION, PBF

processo di manifattura additiva in cui l'energia termica fonde selettivamente alcune regioni di un letto di polvere.

SHEET LAMINATION, SHL

processo di manifattura additiva in cui fogli di materiale vengono incollati per formare una parte.

VAT PHOTOPOLYMERIZATION, VPP

processo di manifattura additiva in cui il fotopolimero liquido in una vasca viene polimerizzato selettivamente mediante polimerizzazione attivata dalla luce.

Le tecnologie applicate al settore delle costruzioni sono inoltre classificate sotto la dicitura *Construction 3D Printing* (C3DP). Esse sono principalmente la tecnologia di estrusione di materiale MEX in cui un braccio robotico o un sistema a portale deposita strati successivi di una miscela di materiale viscoso (plastica fusa, cemento, argilla); la tecnologia a getto di legante BJT in cui un legante liquido viene spruzzato su strati di polvere (ad esempio, sabbia o cemento) per formare le sezioni desiderate; la tecnologia *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) appartenente alla categoria di Deposizione di energia diretta DED che utilizza la saldatura per costruire componenti metallici strato per strato.

La Manifattura Additiva applicata all'architettura nasce dall'adattamento delle tecnologie di stampa 3D, originariamente sviluppate per materiali come plastica e resine, al settore delle

costruzioni. Questo approccio è stato inizialmente studiato da J. Pegna nel 1997 e poi sviluppato dal Professor Behrokh Khoshnevis della University of Southern California nei primi anni 2000. Nel 2004, il laboratorio di Khoshnevis realizzò il primo muro stampato in 3D, utilizzando un sistema a portale con una pompa per calcestruzzo controllata digitalmente con la tecnologia *Contour Crafting*. Sebbene questo prototipo fosse di dimensioni ridotte (circa un metro di altezza e larghezza), rappresentava un passo avanti fondamentale verso l'uso della stampa 3D per la costruzione rapida di edifici economici, unici e sostenibili, con un ridotto intervento umano.

La stampa 3D ha origine con l'invenzione della Stereolitografia, ideata da Charles Hull nel 1986. Hull coniò il termine per descrivere un processo che combinava la fotografia stereoscopica, che consente di percepire il mondo in 3D grazie alla visione binoculare, con la litografia, il trasferimento di immagini attraverso l'incisione su un supporto. La Stereolitografia è un processo di produzione additiva, in particolare di fotopolimerizzazione in vasca VVP, che replica oggetti tridimensionali suddividendone le informazioni in sezioni bidimensionali. Questo principio è alla base della stampa 3D moderna, dove un oggetto digitale viene convertito in un file STL (*Standard Tessellation Language*), per poi essere processato in un software CAM detto di *slicing*⁴ diventando un *Gcode*⁵ ed essere utilizzabile dalle stampanti per realizzare il manufatto strato dopo strato. Hull fonderà la 3DSystems, ancora oggi leader mondiale all'apice del settore. Gli adattamenti al settore edile però partono da una tecnologia differente rispetto alla Stereolitografia ovvero la tecnologia a deposito di materiale fuso (*Fused Deposition Modelling* FDM). Essa viene brevettata nel 1989 dall'ingegnere statunitense Scott Crump che fonderà l'azienda *Stratasys*, anch'essa leader nel settore ancora oggi. Solo nei primi anni 2000 però, con la messa sul mercato di stampanti desktop⁶, si assiste alla larga diffusione della tecnologia di stampa 3D. Questo spiega la datazione delle prime ipotesi di adeguamento della

tecnologia al settore edile. Il punto di svolta è avvenuto con la scadenza del brevetto della tecnologia FDM nel 2009 che ne ha consentito la commercializzazione ad un numero sempre maggiore di aziende. Ulteriore fattore determinante alla diffusione della tecnologia è la popolarità del progetto RepRap (abbreviazione di *"Replicating Rapid Prototype"*). RepRap è un progetto di stampante 3D open source avviato nel 2005 dal dott. Adrian Bowyer presso l'Università di Bath, in Inghilterra. L'obiettivo del progetto era creare una stampante 3D in grado di replicare la maggior parte dei propri componenti, riducendo così i costi e rendendola più accessibile a una più ampia gamma di persone, in particolare alla comunità dei maker e ai laboratori di fabbricazione su piccola scala. La natura open source di questo progetto, insieme alla crescente alfabetizzazione digitale – complice la diffusione del Web in quegli anni – ha stimolato l'emergere di un movimento culturale interessato allo sviluppo della tecnologia.

Focalizzandoci sulla tecnologia del Material Extrusion che consente l'estrusione diretta di materiali edili, registriamo numerose applicazioni con il calcestruzzo per la stampa di unità abitative, padiglioni, ponti pedonali, elementi non strutturali con geometrie complesse e stampi per componenti portanti. Il processo si adatta per stampe in continuo in-situ e per prefabbricazioni off-side. Personalizzazione, creazione di geometrie complesse e automazione dei processi digitali sono i principali benefici vagliati nei progetti pilota eseguiti. La tecnologia è caratterizzata da un sistema di pompaggio che spinge il materiale viscoso all'estrusore il quale, muovendosi all'interno del volume di stampa, sedimenta il materiale strato su strato sino all'ultimazione del manufatto. È possibile distinguere le differenti tipologie di meccanica in funzione del modo in cui l'estrusore si muove all'interno del volume di stampa:

MECCANICA CARTESIANA:

Il funzionamento si articola sui tre assi cartesiani X, Y e Z. L'estrusore si muove all'interno del volume di stampa scorrendo

in modo lineare sugli assi, determinando in questo modo la sua posizione. Un esempio sono le tecnologia a carro ponte come BOD2 dall'azienda COBOD⁷;

MECCANICA DELTA:

L'estrusore è ancorato da tre bracci che si muovono su guide verticali. Lo scorrimento dei tre bracci sul rispettivo asse determina la posizione nello spazio dell'estrusore. Esempio di tale tipologia è la stampante Delta Wasp 3MT Concrete⁸;

MECCANICA POLARE:

Il funzionamento e la movimentazione dell'estrusore sono paragonabili al meccanismo di una gru. La stampante Crane Wasp⁹ ne è un esempio;

STAMPA ATTRAVERSO BRACCIO ROBOTICO:

La movimentazione dell'estrusore è affidata alla meccanica di un braccio robotico a 6 assi. Un esempio è il sistema messo a punto dall'azienda CyBe¹⁰.

Oltre al cemento, i materiali che possono essere estrusi direttamente possono essere: plastica, argilla, vetro, e una varietà di miscele a base di resina.

La plastica, grazie alla sua economicità e compatibilità con stampanti 3D desktop, è ampiamente utilizzata su piccola e media scala, mentre l'integrazione con bracci robotici industriali ha permesso la stampa su larga scala, consentendo la realizzazione di interi involucri edilizi. Disponibile sotto forma di filamenti o pellet polimerici, il materiale viene riscaldato e depositato, solidificandosi al di sotto del punto di cristallizzazione. Rispetto al cemento, la plastica offre maggiore versatilità in termini di modalità di stratificazione. Questo ci consente di approfondire le varianti di deposizione del materiale frutto della combinazione di progettazione digitale avanzata, controllo robotico e conoscenza delle proprietà del materiale.

ESTRUSIONE PLANARE. È la tecnica più comune nella Manifattura Additiva, deposita strati orizzontali con pareti parallele o rastremate lungo l'asse verticale. La rastremazione si ottie-

ne modificando progressivamente la sezione trasversale della stampa, ma la stabilità strutturale dipende dagli sbalzi, poiché angoli troppo acuti tra la parete stampata e il piano orizzontale possono compromettere la solidità del materiale. Angoli di sbalzo tipici per i materiali plastici si aggirano attorno ai 35 gradi.

ESTRUSIONE NON PARALLELA. Un'alternativa è la stampa non parallela, che segue le isoline di un modello digitale modificando l'angolo dell'estrusore, creando geometrie radiali o inclinate, spesso supportate da piattaforme rotanti che facilitano la produzione di strutture curve o a spirale senza ausili aggiuntivi.

STAMPA RETICOLARE. La stampa reticolare rappresenta un ulteriore approccio innovativo per la stampa con materiale plastico. Segmenti autoportanti vengono estrusi nel vuoto, congiungendosi a supporti verticali precedentemente stampati. La fattibilità richiede un controllo rigoroso dei parametri di raffreddamento e deposizione per garantire l'indurimento rapido dei segmenti, evitando cedimenti. È fondamentale progettare con attenzione per prevenire collisioni tra l'estrusore e le parti stampate.

L'interesse della ricerca è verso il materiale terra cruda. Questo materiale è paragonabile al calcestruzzo nella metodologia di estrusione. Le dimensioni delle strutture stampabili variano in base alla configurazione della macchina: un braccio robotico, ad esempio, può coprire un involucro di 4 x 1,3 x 3,2 m, espandibile fino a 12 x 3 x 3,2 m se montato su rotaie. Gli strati stampati possono avere altezze tra 6 e 15 mm, con larghezze proporzionali tra 30 e 80 mm. Tuttavia, a differenza dei materiali plastici, la capacità di creare sporgenze non supportate è limitata, con un angolo massimo di circa 80 gradi rispetto al piano orizzontale. Le strutture in calcestruzzo e terra stampate in 3D devono operare prevalentemente sotto carico compressivo, in quanto l'assenza di rinforzi integrati limita la loro capacità di assorbire carichi di trazione. L'argilla è un materiale versatile,

economico e largamente disponibile, utilizzabile direttamente in loco con un'impronta ecologica ridotta. Progetti innovativi come quelli realizzati dall'azienda WASP, dall'istituto di ricerca IAAC e dallo studio di design Emerging Objects dimostrano come la manifattura additiva possa integrare tecniche tradizionali e materiali locali per creare architetture accessibili e a basso impatto ambientale. Tali progetti saranno descritti nel prossimo paragrafo. La manifattura additiva con argilla e terra cruda richiede un attento controllo del contenuto di umidità per garantire un'estrusione uniforme e la coesione degli strati. Rispetto ai metodi di costruzione tradizionali, offre vantaggi significativi in termini di riduzione dei rifiuti, maggiore precisione e abbattimento dei costi legati alla produzione di stampi. Inoltre, la capacità di ottimizzare le risorse tramite tecniche come l'ottimizzazione topologica consente di ridurre ulteriormente il consumo di materiale e i costi associati. In generale, la manifattura additiva rappresenta un metodo di costruzione più sostenibile rispetto ai metodi tradizionali, con una potenziale riduzione dei rifiuti di costruzione tra il 30% e il 60%.

Gli interessi della ricerca in questo settore riguardano alcuni avanzamenti necessari per lo sviluppo della tecnologia:

CONTROLLO DEL MATERIALE VISCOSO DURANTE IL PROCESSO DI STAMPA. La preparazione del materiale per la stampa è un'operazione fondamentale ma allo stesso tempo di difficile standardizzazione. Il materiale viscoso deve risultare abbastanza fluido da consentirne il pompaggio sino all'estrusore, ma allo stesso tempo sufficientemente denso da sostenere il suo peso una volta estruso, senza deformarsi. Inoltre, il comportamento nel tempo dei materiali da costruzione, come il cemento e l'argilla, spesso costringe ad intervenire manualmente sul flusso di stampa. Il flusso di stampa è inteso come la quantità di materiale estruso in una frazione di tempo ed è influenzato dalla velocità del sistema di pompaggio. È necessario produrre avanzamenti sul controllo automatico di tali parametri in relazione allo stato del materiale.

MECCANICA DELLE STAMPANTI. Nel settore delle costruzioni, date le dimensioni dei manufatti realizzati, risulta necessario attuare sistemi di stampa che non per forza abbiano un volume maggiore dell'oggetto stampato.

SISTEMA NORMATIVO PER LE COSTRUZIONI REALIZZATE IN MANIFATTURA ADDITIVA. Seppur i materiali utilizzati in tali processi siano quelli tradizionali del settore delle costruzioni, è necessario provvedere ad un sistema normativo per le strutture stampate in 3D che ne certifichi il processo e i manufatti ottenuti. Il cemento stampato in 3D, ad esempio, assume un comportamento anisotropo a causa della sua conformazione per strati, pertanto, non può essere paragonato ad un cemento messo in opera con tecniche tradizionali.

3.2 MATERIAL EXTRUSION IN ARCHITETTURA CON TERRA CRUDA

Negli ultimi anni, la ricerca sull'impiego della terra cruda nella manifattura additiva ha dato vita a una serie di prototipi innovativi che esplorano le potenzialità della tecnica del material extrusion. Questo approfondimento si propone di analizzare alcuni tra i progetti più significativi, disposti in ordine cronologico per delineare l'evoluzione scientifica e tecnologica del settore. Si parte con *Terraperforma* (2013) dell'IAAC, una sperimentazione pionieristica sulla stampa 3D con materiali naturali, per proseguire con *Gaia* (2018) di WASP, una struttura abitativa sostenibile realizzata con risorse locali. Seguono *Earth Wall* (2019) dell'IAAC, che approfondisce le prestazioni strutturali della terra cruda, e *Tecla* (2021) di WASP, un prototipo abitativo completamente stampato in 3D. Infine, vengono presentati *Casa Covida* (2021) di Emerging Objects, esempio di integrazione tra innovazione e tradizione, *Tova* (2022) dell'IAAC, focalizzato sull'economicità e replicabilità del processo, e il *Dior Pop-Up Store* (2023) di WASP, che testimonia l'applicazione di queste tecnologie anche nel design commerciale. Questi esempi permettono di tracciare un quadro chiaro del progresso scientifico e del potenziale delle tecnologie additive nel contesto della bioedilizia e del design sostenibile.

3.2.1 TERRAPERFORMA

TerraPerforma è un progetto dell'IAAC sviluppato nell'ambito dell'Open Thesis Fabrication nel 2016-17. Il progetto esplora la manifattura additiva su larga scala con tecniche additive applicate a materiali tradizionali, puntando a creare strutture con prestazioni avanzate. Integrando l'argilla con nuove tecnologie, il team ha sviluppato un prototipo che ne dimostra il potenziale per l'architettura sostenibile. Il progetto si articola in due fasi: fabbricazione robotica e sviluppo di un design performante per dimostrare le qualità dell'argilla. La prima fase comprende la calibrazione robotica, seguita da un'analisi climatica. Il design finale, basato su tutte le ricerche integrate, presenta un approccio modulare applicabile alla stampa in loco. Durante il progetto sono stati analizzati tre siti in diverse aree del mondo con condizioni climatiche variabili, dall'estremo all'ideale. La tecnologia adottata combina fabbricazione robotica e produzione additiva. TerraPerforma si è basato su due precedenti progetti dell'IAAC: Pylos, che prevedeva lo sviluppo di un estrusore con un contenitore da 15 litri, e Fabclay, utile per comprendere il comportamento dei materiali nella fabbricazione robotica. La combinazione di questi due progetti ha consentito di ottenere un modello efficiente. La performance del progetto è stata valutata considerando la conducibilità termica, la massa termica, la convezione e le radiazioni solari, oltre a illuminazione e comportamento del vento. La conducibilità termica è stata ottimizzata tramite il controllo della geometria per migliorare la resistenza al calore. La convezione è stata migliorata progettando canali del vento per dirigere i flussi d'aria in modo efficiente, ottimizzando al contempo le prestazioni della stampante 3D. Per l'illuminazione, i test hanno dimostrato che una serie di piccole aperture è preferibile per evitare il surriscaldamento rispetto ad aperture più ampie. La direzione del riempimento segue i vettori del sole, adattandosi alla posizione stagionale del sole. Il team ha sviluppato un mix di

materiali per migliorare l'argilla, aggiungendo sostanze come gelatina, acqua e esametafosfato. L'argilla ha un'impronta ecologica massima, è riciclabile e offre un buon isolamento grazie all'inerzia termica. Le strutture in argilla aiutano anche a regolare l'umidità interna grazie alle proprietà di assorbimento ed evaporazione. Dopo aver analizzato diversi tipi di argilla, è stato confermato che quella più densa, con grana fine e minor richiesta di acqua, è la più adatta per la stampa 3D, sottolineando l'importanza del giusto rapporto tra i materiali. TerraPerforma è un progetto in evoluzione che punta a esplorare ulteriormente il potenziale della combinazione tra fabbricazione robotica e produzione additiva e rappresenta una base importante per lo sviluppo della stampa 3D con la terra come materiale da costruzione.

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

► Dettaglio del blocco di
terra
© IAAC

► ► Alla pagina seguente:
il prototipo
TerraPerforma
© IAAC

▼ Il processo di
realizzazione dei blocchi
tramite estrusione con
robot
© IAAC



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



3.2.2 GAIA

Gaia è il primo modulo abitativo ecosostenibile realizzato con la tecnologia di manifattura additiva dall'azienda WASP, utilizzando terra cruda come materiale principale. Il nome – un richiamo alla dea latina che personifica la Terra – sottolinea la connessione con l'ambiente naturale. Il modulo è stato costruito in soli 10 giorni, impiegando materiali locali a chilometro zero, con un costo di circa 900 euro per la muratura. L'ingresso è orientato a sud-ovest e dotato di un'ampia vetrata, la quale, grazie agli apporti solari passivi, contribuisce a compensare la dispersione termica. La parete esterna è stata progettata per massimizzare l'efficienza dell'irraggiamento solare, offrendo al contempo maggiore stabilità strutturale. Per rispettare la normativa vigente, sono stati inseriti pilastri in legno, sui quali è ancorata la copertura coibentata. Questa presenta un prolungamento sul lato sud-ovest che garantisce un migliore ombreggiamento dell'ingresso. Le fondazioni sono realizzate in cemento stampato in 3D, all'interno del quale sono stati integrati i sistemi di ventilazione e gli impianti elettrici. Il modulo non necessita di un sistema di riscaldamento o di climatizzazione, poiché mantiene una temperatura interna confortevole sia in inverno che in estate. WASP ha sviluppato la tecnologia necessaria alla realizzazione di Gaia, creando la stampante "Crane". Questa è composta da tralicci a sezione triangolare, con un'area di stampa di circa 6,3 metri di diametro e un braccio estrusore montato sui tre montanti. La struttura ha una forma esagonale, ripetibile potenzialmente all'infinito. Il modulo abitativo di circa 30 mq è estremamente efficiente e utilizza intonaco a base di argilla e lolla di riso, riducendo l'impatto ambientale. La lolla di riso, derivante dagli scarti della produzione del riso, è impiegata come isolante termoacustico, inserita

nelle canalizzazioni all'interno della muratura. Queste canalizzazioni favoriscono anche una ventilazione naturale con flusso ascendente. L'impiego di materiali locali consente di ridurre significativamente i costi di produzione, rendendo necessario trasportare sul sito di costruzione solo la tecnologia di stampa. La particolare geometria della sezione muraria migliora la sovrapposizione dei layer, consentendo una migliore adesione tra di essi e riducendo il rischio di rotture dovute al ritiro del materiale durante l'essiccazione. Questo contribuisce alla solidità complessiva della struttura e alla variazione geometrica lungo la muratura. La progettazione computazionale, realizzata tramite codice Grasshopper, consente di creare geometrie complesse, difficilmente riproducibili con tecniche costruttive tradizionali, aprendo nuove possibilità nella costruzione di abitazioni ecosostenibili.

Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Il processo realizzativo
 tramite la stampante
 CRANE
 © WASP



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Dettaglio del prototipo
 GAIA
 © WASP



▼ Il prototipo GAIA
 © WASP

3.2.3 EARTH WALL

Earth Wall è un progetto ideato da IAAC e realizzato con il supporto di Crane WASP, all'interno della ricerca Open Thesis Fabrication (OTF), un programma dello IAAC incentrato sull'uso della produzione additiva in edilizia. Questo progetto si inserisce in una collaborazione strategica tra WASP e IAAC, volta a sviluppare soluzioni di stampa 3D per la costruzione di abitazioni accessibili e sostenibili. Il prototipo è una porzione di parete di 4 m di altezza, parte di un concept per una casa in terra stampata in 3D. La ricerca sui materiali ha mirato a sviluppare una miscela di terra a base di argilla, arricchita con additivi organici e minerali, al fine di migliorare la resistenza meccanica e le proprietà strutturali della parete. Gli ingredienti principali, argilla e fibra di riso, sono stati selezionati in base alla disponibilità locale, ai costi e all'impatto sul carbonio incorporato. La stampa del prototipo ha richiesto 40 ore, utilizzando un totale di 2 m³ di terra estrusa. Dal punto di vista del design, la parete è stata suddivisa in moduli, ciascuno dotato di un gradino e di una trave strutturale ancorati su entrambi i lati. Elementi in legno a incastro sono stati integrati nella struttura per fornire il supporto necessario a scale e pavimenti. Nei progetti speculativi su scala maggiore, questi moduli di parete possono includere variabili combinazioni di travi e gradini su entrambi i lati, come nel caso del prototipo, per garantire un ancoraggio sicuro. Il montaggio delle scale e delle travi strutturali è avvenuto in due fasi: durante la stampa 3D sono stati inseriti ricettori in legno nelle cavità della parete, e dopo l'asciugatura (quattro giorni dopo la stampa), i supporti diagonali sono stati fissati ai ricettori, con i gradini montati sopra. Il legno di pino è stato utilizzato per ricettori, supporti diagonali e travi, mentre i gradini sono stati realizzati in OSB (Oriented Strand Board). Questo prototipo esplora l'interazione tra il design ingegneristico generato al computer e la modifica dei parametri di stampa, adattandosi a variazioni nella composizione dei materiali locali.

Nello specifico, i prototipi di prova sono stati costruiti utilizzando terra di Barcellona, mentre l'Earth Wall in scala reale è stato realizzato con materiale italiano, richiedendo un adattamento del progetto ingegneristico in base alle nuove proprietà del materiale, reso possibile grazie agli strumenti di calcolo sviluppati. In sintesi, Earth Wall dimostra il potenziale dell'integrazione di componenti strutturali in pareti di terra stampate in 3D, aprendo la strada a soluzioni architettoniche innovative e contribuendo ai recenti sviluppi della stampa additiva nel settore edilizio.

Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Il prototipo EARTH WALL ►
 © WASP

Alla pagina seguente: ►
 Dettaglio del prototipo
 EARTH WALL
 © WASP

Il processo realizzativo ▼
 tramite la stampante
 CRANE
 © WASP



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



3.2.4 TECLA

TECLA (Technology and Clay) è un prototipo di abitazione circolare a basse emissioni di carbonio, che unisce la ricerca sull'architettura vernacolare, i principi bioclimatici e l'impiego di materiali naturali e locali.

La struttura risultante è composta da due volumi a cupola aperta, caratterizzati da una forma compressiva e da pareti sinusoidali che assicurano stabilità strutturale sia durante la fase di stampa che in quella di utilizzo. L'involucro è ottimizzato parametricamente per garantire un equilibrio tra massa termica, isolamento e ventilazione, rispondendo ai requisiti di comfort termico. L'abitazione TECLA copre una superficie di circa 60 metri quadrati, raggiunge un'altezza di 4,2 metri e comprende una zona giorno, una cucina, uno spazio notte, oltre a servizi e lucernari circolari per una buona illuminazione naturale.

Gli arredi, concepiti secondo i principi della circolarità, sono integrati nella struttura in terra cruda e parzialmente realizzati in terra locale, pensati per essere riciclabili o riutilizzabili. La costruzione dei moduli abitativi TECLA avviene in circa 200 ore di stampa, utilizzando 7.000 righe di codice macchina (G-code). Le pareti, composte da 350 strati impilati da 12 millimetri ciascuno, rappresentano 150 chilometri di estrusione e 60 metri cubi di argilla, prelevata dal letto di un fiume vicino. La tecnologia consuma in media meno di 6 kW di energia per ora, mentre l'uso di materiali locali riduce significativamente gli scarti di produzione.

Il progetto è il risultato della collaborazione tra Mario Cucinella Architects e WASP, con il supporto di Mapei, che ha contribuito alla ricerca sui materiali e ottimizzato la miscela di terra cruda per la stampa 3D. I test strutturali sono stati condotti da Milan Ingegneria, che ha lavorato sull'ottimizzazione della forma per garantire una struttura autoportante e stabile. I telai delle finestre ad arco sono stati realizzati da Capoferri, specialista in serramenti architettonici, mentre l'architettura del paesaggio

è stata curata da Frassinago. RiceHouse ha fornito consulenza tecnica sull'utilizzo di biomateriali derivati dagli scarti della coltivazione del riso, per migliorare le prestazioni termiche dell'involucro dell'edificio. L'illuminazione è stata sviluppata da Lucifero's, puntando alla massima sostenibilità e flessibilità.

Le soluzioni Mapei impiegate nell'impasto per la stampa 3D includono: MAPESOIL 100, un agente stabilizzante che garantisce la durabilità dell'impasto; DYNAMON SR4, un additivo superfluidificante per mantenere la lavorabilità e la pompabilità del composto; PLANISEAL WR 100, un idrorepellente premiscelato applicato sulle pareti asciutte per impermeabilizzarle entro 12 ore. Il muro è composto da due strati: uno interno più spesso, riempito con lolla di riso per l'isolamento, e uno esterno dotato di cavità che fungono da canali di ventilazione.

Angelo Vito Graziano
Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Il processo realizzativo
tramite la stampante
CRANE
© WASP



Dettaglio del prototipo
TECLA
© WASP

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Dettaglio del prototipo
TECLA
© WASP

▼ Il prototipo TECLA
© WASP



3.2.5 CASA COVIDA

Emerging Objects è uno studio con sede in California e Colorado (USA), specializzato nella manifattura additiva per l'architettura e nella sperimentazione con materiali innovativi e diversificati. Fondato da Ronald Rael e Virginia San Fratello, l'approccio dello studio è profondamente influenzato dall'attivismo e dalla relazione con il contesto sociale e culturale dei luoghi in cui i loro progetti prendono vita. Ronald Rael è il CEO e professore di architettura presso l'Università della California a Berkeley, mentre Virginia San Fratello è chief creative officer e insegna design alla San Jose State University. L'obiettivo di Emerging Objects è quello di usare il design per stimolare riflessioni sociali e politiche, mediare situazioni complesse e incoraggiare un ripensamento delle pratiche esistenti. La California è un terreno di confine esteso che unisce tradizioni indigene e contemporanee, caratterizzato da una fusione di conoscenze e materiali locali. In questa regione, Emerging Objects si dedica soprattutto al lavoro di laboratorio, mentre nella base del Colorado si sperimenta con la terra locale per la stampa 3D architettonica. L'approccio dello studio prevede l'impiego di materiali locali per creare oggetti e manufatti contemporanei, cercando di rendere la tecnologia della manifattura additiva più accessibile, anche attraverso l'uso di materiali economici o di scarto come bucce d'uva, sale e segatura. Durante la pandemia di Covid-19, Ronald Rael ha avviato la costruzione di "Casa Covida" nel laboratorio del Colorado, realizzata interamente in terra cruda stampata in 3D. Questo progetto è un esperimento di costruzione sostenibile, che utilizza materiali locali come argilla, acqua e paglia di grano. Rael vede la terra come un'opportunità ecologica per l'architettura moderna, e Casa Covida rappresenta uno sforzo per allineare questo materiale ancestrale alle sensibilità contemporanee, dimostrando come la tecnologia possa contribuire a una nuova forma di costruzione radicata nella tradizione. Casa Covida si trova nella

San Luis Valley, nel sud del Colorado, una regione storicamente legata al Messico e considerata terra sacra dai popoli nativi come Apache Ute, Pueblo e Navajo. La casa è composta da tre ambienti rotondi interconnessi che fungono da camera da letto, salotto con camino e bagno, ciascuno dotato di un oculo come unica fonte di luce naturale. Il progetto ha vinto il premio "Art + Technology Lab Grant 2020" del Los Angeles County Museum of Art e rappresenta una sintesi perfetta tra tradizione e innovazione: un'architettura che fonde elementi culturali locali con il potenziale della tecnologia contemporanea. Il lavoro di Emerging Objects celebra le tradizioni del passato, reinterpretandole attraverso la lente della tecnologia moderna, creando una forma ibrida di artigianato e design in cui si incontrano culture, materiali e sensibilità diverse. Casa Covida, costruita su un terreno di famiglia, è simbolo di resilienza e convivenza, un progetto nato in risposta alle sfide della pandemia e progettato per esplorare nuove modalità di vivere e interagire con l'ambiente circostante.

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



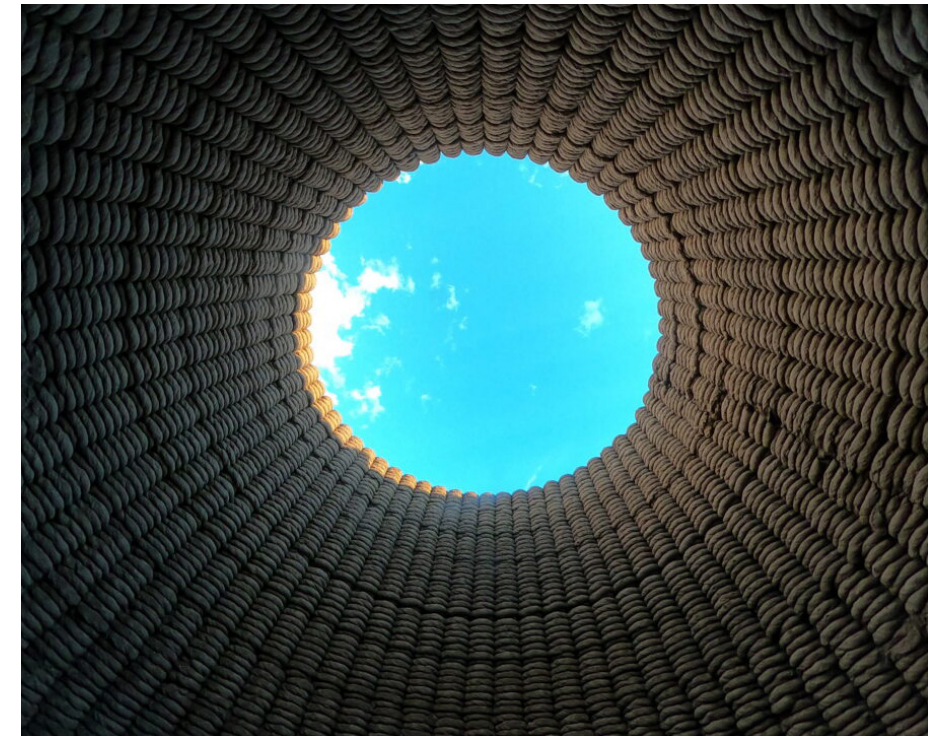
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Dettaglio del prototipo
CASA COVIDA
© EMERGING OBJECT

◀◀ Alla pagina precedente:
Dettaglio del prototipo
CASA COVIDA
© EMERGING OBJECT

▼ Il prototipo CASA
COVIDA
© EMERGING OBJECT



3.2.6 TOVA

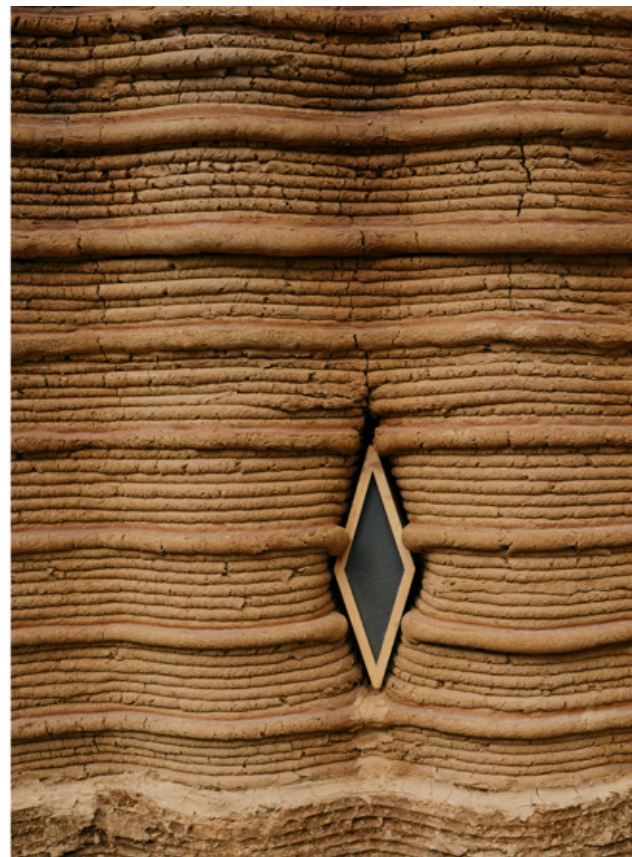
TOVA è la prima costruzione di questo tipo realizzata in Spagna presso i Valldaura Labs di Barcellona. Questo progetto è il risultato di una ricerca dell'Istituto IAAC ed è stato concepito come prototipo di abitazione sostenibile, replicabile ovunque nel mondo. Utilizzando la tecnologia di stampa 3D CRANE WASP, il progetto è stato completato in sette settimane, impiegando esclusivamente materiali e manodopera locali. Il team IAAC ha attinto alle risorse circostanti, reperendo le materie prime nel raggio di 500 metri dal sito. Il progetto è stato studiato attraverso simulazioni digitali e test fisici, prendendo in considerazione l'LCA (Life Cycle Assessment) dei componenti per ridurre al minimo l'impatto ambientale. Le condizioni climatiche locali hanno influenzato la posizione e la dimensione delle aperture, i materiali utilizzati per il tetto e le pareti, nonché l'intero processo costruttivo. La dimensione compatta di 9 m² è stata determinata dal raggio operativo della stampante e dalle esigenze logistiche dei tempi di stampa, per completare il progetto nei due mesi stabiliti. La forma compatta ottimizza la ritenzione del calore, mentre alcune parti possono essere aperte per favorire il raffreddamento naturale durante i mesi più caldi. Le pareti sono dotate di una rete di cavità isolanti per prevenire la dispersione termica in inverno e proteggere dal calore estivo. La scelta dei materiali si è basata sulle caratteristiche del terreno del sito, che ha portato all'uso di geopolimeri durevoli per il substrato e di una miscela di terra composita per le pareti. Le prestazioni strutturali sono state verificate tramite simulazioni di carico, osservando l'essiccazione, il restringimento e la resistenza alla trazione della miscela. Per minimizzare eventuali problemi durante la stampa e l'assemblaggio finale, alcuni dettagli chiave del progetto sono stati prototipati in scala 1:1, tra cui le aperture, la struttura del tetto, gli arredi integrati e l'impermeabilizzazione delle pareti. Durante la fase di stampa con la Crane 3D WASP, sono stati applicati non più

di dieci strati al giorno per evitare problemi strutturali causati dall'esposizione all'ossigeno. Per migliorare la durabilità del materiale, è stato aggiunto un rivestimento impermeabile utilizzando materiali naturali come aloe e albumi d'uovo, conferendo alle pareti la flessibilità necessaria per adattarsi agli sbalzi termici ed evitare la formazione di crepe. Il progetto finale ha generato pochi rifiuti, con un'energia incorporata prossima allo zero. Come parte della ricerca in corso sulla costruzione in terra stampata in 3D, il team ha raccolto e analizzato dati mediante sensori di temperatura e umidità all'interno delle pareti. La stampa in loco e l'uso di materiali naturali hanno garantito un processo circolare, senza necessità di trattamenti chimici, poiché alla fine del ciclo di vita l'edificio può essere riciclato restituendo la terra al sito di origine, evitando così ogni forma di contaminazione.

Il progetto TOVA rappresenta la sintesi tra conoscenza dei materiali, artigianato e metodi di ottimizzazione del design all'avanguardia, rendendo possibile la costruzione sostenibile di edifici in terra stampata in 3D.

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Il prototipo TOVA
© IAAC

◀◀ Alla pagina precedente:
Il prototipo TOVA (in alto)
Dettagli del prototipo
TOVA (in basso)
© IAAC

▼ Il prototipo TOVA
© IAAC



3.2.7 DIOR POP UP STORE

Dior, in collaborazione con l'azienda di stampa 3D WASP, ha realizzato un pop-up store che esplora le potenzialità della produzione additiva. L'edificio è stato costruito direttamente sul posto utilizzando la stampante 3D Crane Infinity di WASP, un sistema modulare ispirato alle gru tradizionali, pensato per la fabbricazione architettonica su larga scala. L'unità di stampa è stata adattata per conformarsi alle dimensioni dei due involucri da costruire, ciascuno con un diametro di 6,6 metri e un'altezza di 3 metri. Le pareti del negozio sono state stampate in modo additivo usando due stampanti Crane WASP contemporaneamente, minimizzando l'intervento umano. La costruzione ha richiesto 120 ore per realizzare i due involucri modulari, che coprono una superficie totale di 80 metri quadrati e utilizzano 55 tonnellate di materiale stampato.

La vera caratteristica distintiva della produzione additiva è la possibilità di progettare il materiale utilizzato per la costruzione. Per il pop-up store, è stata impiegata una miscela naturale di argilla, sabbia e fibre grezze, che è stata distribuita in strati per creare le pareti. L'estrusione del materiale avviene seguendo percorsi digitalmente pianificati: attraverso sistemi a gru o a portale controllati digitalmente, le strutture si costruiscono autonomamente, con un minimo di intervento umano. Le leggere variazioni nei movimenti della testina di stampa e nel punto di erogazione del materiale generano l'effetto finale delle pareti. L'artigianato digitale utilizzato in questo progetto ha dato vita a un linguaggio di design ibrido, in cui la facciata in 3D combina texture terrose, tracce del processo di stampa stratificato e l'iconico motivo Dior. Il Cannage Motif, simbolo distintivo di Dior, decorava le pareti del pop-up store, esprimendo l'identità del marchio e fungendo anche da elemento architettonico. Questo motivo, che trae origine dalla tecnica di intreccio del rattan, ha una storia ricca risalente al XVIII secolo e viene spesso associato alla decorazione delle sedie. Nel caso

del pop-up store, il motivo è stato integrato direttamente nella costruzione, rendendolo parte integrante del progetto. Poiché i materiali a base di terra hanno scarsa resistenza alla trazione, i tetti delle strutture sono stati realizzati con un sistema strutturale separato. Per garantire stabilità, le pareti stampate in 3D presentavano rientranze per l'inserimento delle colonne di supporto del tetto in acciaio, poi rivestite con pannelli bianchi per nascondere la struttura portante.

Combinando moda, architettura e tecnologia, questo concept store offre uno sguardo sul futuro della fabbricazione automatizzata degli edifici. Unendo l'artigianato tradizionale con le più avanzate tecniche di produzione, ha creato uno spazio che celebra l'identità del marchio, gli ultimi modelli di moda e le nuove tecnologie costruttive, incarnando una visione del futuro che fonde estetica e innovazione.

Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

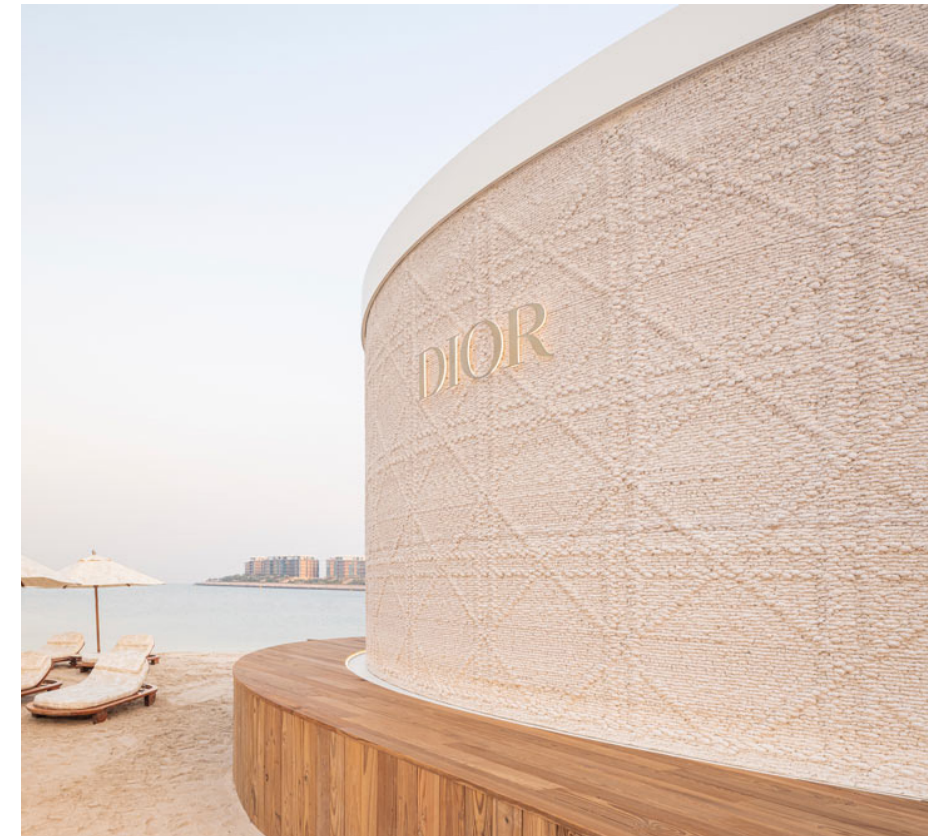


Il processo realizzativo
 tramite la stampante
 CRANE
 © WASP



Dettaglio costruttivo
 che mostra l'intelaiatura
 metallica
 © WASP

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Dettaglio del prototipo
 DIOR POP UP STORE
 © WASP

▼ Il prototipo DIOR POP
 UP STORE
 © WASP



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Note

1 UNI Ente Italiano di Normazione <https://store.uni.com/uni-en-iso-astm-52900-2022>

2 La manifattura sottrattiva è un processo di produzione che fa riferimento a vari processi meccanici di rimozione del materiale a partire da blocchi solidi, barre metalliche, metalli, aste di plastica o altri materiali che prendono forma attraverso la rimozione, il taglio, la trivellazione, la macinazione e la alesatura. Questi processi possono essere eseguiti manualmente, ma più comunemente avvengono attraverso l'utilizzo di un computer a controllo numerico (CNC). La manifattura formativa è un processo di manifattura volto ad ottenere prodotti attraverso l'iniezione di plastica fusa in uno stampo, poi raffreddata e solidificata. Il metodo è indicato per la produzione in serie di prodotti occupando un ruolo importante nell'area della lavorazione della plastica.

3 Tutti i processi sono descritti in maniera dettagliata nell'Allegato A della normativa a cui si rimanda per un maggiore approfondimento.

4 Un software di slicing è un programma che trasforma un modello 3D in istruzioni G-code, dividendo l'oggetto in strati e configurando i parametri di stampa per guidare la stampante 3D.

5 Il G-code è un linguaggio di programmazione standard utilizzato per controllare macchine a controllo numerico (CNC), incluse le stampanti 3D, specificando istruzioni dettagliate per i movimenti, la velocità e le operazioni dell'estrusore o di altri utensili durante il processo di produzione.

6 Le stampanti 3D desktop, rispetto alle macchine industriali, sono dispositivi compatti e più accessibili, progettati per applicazioni personali o professionali su piccola scala, utilizzando materiali come filamenti plastici o resine, mentre le macchine industriali sono progettate per produzioni su larga scala, offrono maggiore precisione, velocità e supportano una gamma più ampia di materiali avanzati, come metalli e polimeri ad alte prestazioni.

7 <https://cobod.com/solution/bod2/>

8 <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-cemento-delta-wasp-3mt-concrete/>

9 <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>

10 <https://cybe.eu/>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



SEZIONE 2

Metodologia e campo di applicazione della
ricerca

4. PROCESSI INNOVATI: Dalla progettazione informata alla realizzazione, file to factory

4.1 L'AUTOCOSTRUZIONE DIGITALE: LE RICERCHE PRESSO IL FABLAB POLIBA

La disciplina del progetto in architettura, nell'era contemporanea, ha attraversato importanti cambiamenti. Solo quarant'anni fa il disegno di cartografie urbane o di tavole di dettaglio su elementi costruttivi di un edificio erano prodotti a mano. Testimonianze fotografiche in cui sono ritratti ingegneri e architetti distesi su enormi tavole di carta raccontano una professione in cui non vi era ancora la possibilità di governare la virtualizzazione del progetto e che quindi era necessario raccontare l'intero iter progettuale attraverso la selezione di immagini tecniche gestite con il disegno manuale. Oggi il CAD ha completamente rivoluzionato la professione permettendo di gestire un progetto architettonico attraverso modelli virtuali sempre più avanzati e integrati. Questi modelli sono in grado di simulare in modo sempre più preciso il comportamento reale del progetto prima della sua effettiva realizzazione. L'industrializzazione dei processi produttivi e la conseguente standardizzazione delle parti di prodotti hanno colpito il settore edile, influenzando il progetto architettonico, e le filiere del settore manifatturiero così come l'artigianato, oggi, è un mercato indirizzato ad un bacino di utenza specifico con una crescente scomparsa di figure qualificate nella manodopera. L'architetto e l'artigiano hanno la necessità di concepire l'opera consapevoli di quello che i processi industriali propongono considerando che la manodopera specializzata per la produzione di forme complesse è quasi assente. Proiettando uno scenario critico, il ruolo dell'architetto potrebbe ridursi alla mera selezione di soluzioni e prodotti standardizzati, sviluppati e proposti dalle aziende in conformità a strategie di marketing industriale. In questo contesto, il concetto di "su misura", ampiamente enfatizzato dal settore produttivo, verrebbe reinterpretato come una semplice capacità tecnica di realizzare, tramite l'ausilio del CAD, prodotti con un alto grado di precisione, adattandoli a specifiche con-

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

dizioni spaziali, ma privi di un'autentica personalizzazione progettuale. È solo questo il potenziale che il CAD offre alla pratica architettonica? Se così fosse, ridurrebbe le potenzialità formali del progetto di architettura in quanto preclude al progettista alcune direzioni formali che conferirebbero significato più profondo e potente al progetto stesso. Al contrario, strumenti CAD avanzati, come i software algoritmici e parametrici, offrono al progettista una libertà formale mai posseduta prima. Essi permettono di progettare architetture informate che prendono in considerazione dati ambientali e strutturali per la propria definizione formale. Si pensi all'ottimizzazione topologica che permette, attraverso una progettazione computazionale con analisi iterative, di individuare la migliore distribuzione di materiale all'interno di una forma per soddisfare specifici requisiti strutturali, riducendo drasticamente il peso e i costi. Il Parametricismo, ad esempio, è un approccio architettonico contemporaneo che utilizza modelli digitali parametrici per creare forme complesse, basate su algoritmi e parametri variabili al fine di generare strutture innovative e adattabili al contesto. Gli edifici, molto spesso caratterizzati da una continuità nelle superfici, tanto da prendere il nome di architetture organiche (richiamando le forme presenti in natura), nascondono un'intelaiatura strutturale complessa composta da un susseguirsi di molteplici sistemi standard trave-colonna. Questo aspetto porta a considerare l'approccio un mero esercizio di estetica architettonica. Di fronte a questo limite la risposta potrebbe essere la relazione tra il CAD e il CAM che consiste nell'utilizzo dei dati progettuali per la codifica dei processi produttivi automatizzati. L'approccio CAD/CAM in architettura, alla scala dell'edificio, può restituire coerenza costruttiva senza limitare le possibilità formali che i nuovi software offrono al progettista? Progetti come Tecla, descritta nei capitoli precedenti, mostrano come questo sia possibile e giustifica l'introduzione della Manifattura Additiva nella disciplina architettonica in virtù di quanto appena raccontato; la figura dell'architetto deve evolversi carican-

dosi di responsabilità rispetto alla processualità costruttiva automatizzata. La figura del progettista e del costruttore tornano ad essere legate e affini come prescritto dalle antiche tecniche auto-costruttive in materiali da costruzione “poveri”. Con auto-costruzione digitale si intende sottolineare che oggi, come ieri, l'architetto e il progettista non possono rimanere estranei al mondo della produzione e all'industria delle costruzioni. Cambia la dimensione tecnica e tecnologica governata dall'automazione e dal digitale, ma non varia l'intima connessione del progetto alla costruzione. Nei volumi *Self Made Architecture 01* e *Self Made Architecture 02/03* si ribadisce questo concetto proponendo una formazione architettonica per i giovani professionisti più orientata ad una assunzione di consapevolezza su temi di questo genere.

Come precedentemente accennato, Tecla è il frutto della collaborazione di figure altamente qualificate in vari ambiti: Mario Cucinella Architects, WASP, Mapei, Milan Ingegneria, Capoferri, Frassinago, RiceHouse e Lucifero's.

Il progetto è stato curato dallo studio Mario Cucinella Architects fondato dall'architetto Mario Cucinella nel 1992 a Parigi, e successivamente trasferito a Bologna, in Italia è conosciuto a livello internazionale per il suo approccio sostenibile all'architettura, con particolare attenzione all'efficienza energetica, all'uso di materiali ecocompatibili e alla riduzione dell'impatto ambientale delle costruzioni. WASP, invece, è un'azienda italiana (acronimo di *World's Advanced Saving Project*) fondata nel 2012 e specializzata nello sviluppo di stampanti 3D innovative. La sezione edilizia dell'azienda ha provveduto alla cantierizzazione dell'opera all'interno di un sito di sua proprietà. WASP è detentrica del brevetto della tecnologia LDM e produttrice della tecnologia di produzione utilizzata: la Crane Wasp. Nessun altro oltre l'azienda WASP sarebbe stato in grado di portare a termine un progetto così strutturato. L'imprescindibilità del sapere sul materiale ha reso necessaria la collaborazione con la più importante azienda italiana del settore: Mapei. Mapei,

fondata nel 1937 a Milano è specializzata nella produzione di adesivi, sigillanti e prodotti chimici per la costruzione. Essa ha ottimizzato la miscela di terra cruda per il processo additivo. I test strutturali sono stati condotti da Milan Ingegneria, che ha lavorato sull'ottimizzazione della forma per garantire una struttura autoportante e stabile. I telai delle finestre ad arco sono stati realizzati da Capoferri, specialista in serramenti architettonici, mentre il progetto architettonico di paesaggio è stata curato da Frassinago. RiceHouse ha fornito consulenza tecnica sull'utilizzo di biomateriali derivati dagli scarti della coltivazione del riso per migliorare le prestazioni termiche dell'involucro dell'edificio. L'illuminazione è stata sviluppata da Lucifero's, puntando alla massima sostenibilità e flessibilità.

L'architetto da sempre è la figura che ha il compito di coordinare e supervisionare tutte le fasi del progetto assicurandosi che la sua architettura non sia snaturata con la definizione della costruzione. Per far sì che ciò accada in questi contesti, per progetti come Tecla, egli deve acquisire determinate competenze e responsabilità riuscendo a dialogare e direzionare chi poi si occuperà di svolgere determinate mansioni. Di seguito sono presentate tre sperimentazioni seguite personalmente dallo scrivente durante il periodo di ricerca dottorale. Tutte riguardano l'utilizzo della manifattura additiva nella pratica architettonica. A tali sperimentazioni seguirà una riflessione sul rapporto tra tecnologia costruttiva e forma architettonica. Oltre a questo, le sperimentazioni hanno testato come la figura dell'architetto si debba circondare di altre figure professionali per portare avanti questa tipologia non comune di progetti. Egli deve formarsi circa materiali e tecnologie in modo molto approfondito facendo esperienza pratica di tutte le fasi progettuali e costruttive. La richiesta di collaborazione interdisciplinare tra architetti, ingegneri, tecnici dei materiali e altre figure, necessaria alle sperimentazioni ha avuto sede presso il FabLab Poliba, laboratorio di fabbricazione digitale del Politecnico di Bari. Docenti universitari, colleghi di dottorato, stu-

denti di architettura e professionisti del settore hanno collaborato alla definizione dei progetti trovando nel FabLab Poliba il luogo ideale dove concretizzare questo scambio di conoscenza. I FabLab (abbreviazione di *Fabrication Laboratory*) offrono accesso condiviso a una varietà di macchinari avanzati, come stampanti 3D, macchine CNC, laser cutter, e altre tecnologie di prototipazione rapida. Nati negli anni 2000 dal *Center for Bits and Atoms* del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), i FabLab sono nati come parte di una visione in cui le tecnologie di fabbricazione digitale diventano accessibili e democratizzate, promuovendo l'innovazione e la creatività individuale o comunitaria. La filosofia dei FabLab si fonda sull'open access e sulla condivisione delle conoscenze, rendendoli luoghi di sperimentazione in cui persone con diverse competenze – tra cui studenti, ricercatori, imprenditori e artisti – possono collaborare per trasformare idee in progetti concreti, passando dal disegno digitale al prototipo fisico. In tal modo, i FabLab rappresentano una componente chiave della terza rivoluzione industriale, dove la personalizzazione della produzione e la decentralizzazione delle risorse definiscono i nuovi paradigmi della produzione di massa. La loro struttura collaborativa e interconnessa a livello globale consente non solo la condivisione di strumenti e tecniche, ma anche la creazione di reti tra FabLab di diverse parti del mondo, amplificando l'impatto dell'innovazione locale attraverso la connettività globale. In ambito accademico e della ricerca, i FabLab sono un esempio significativo di come la fabbricazione digitale possa favorire l'interdisciplinarietà, superando i confini tra design, ingegneria, arte e scienze sociali, e stimolando nuovi approcci alla risoluzione di problemi complessi. Esercizi applicativi a riguardo sono descritti nel volume *FabLab Poliba, laboratorio di fabbricazione digitale*.

4.1.1 STEREOTOMIC GREEN VAULT

La Stereotomic Green Vault² è la prima sperimentazione realizzata nel corso del primo anno di ricerca dottorale il 2022. Il progetto si basa sulla interpretazione della disciplina della stereotomia³ attraverso la tecnologia di manifattura additiva. Il prototipo consiste in un modello di volta a botte ribassata costruita utilizzando un pattern di conci osteomorfi incastrati tra loro in modo reciproco. La relazione tra forma possibile e tecnologia produttiva in questo caso è circoscritta alla disciplina della stereotomia. La sperimentazione testa la facilità con cui è possibile creare oggetti composti da superfici a doppia curvatura con il metodo additivo, che la contrario, con lavorazioni di tipo sottrattivo a controllo numerico, risultano abbastanza complesse. L'uso di blocchi stereotomici osteomorfi è stato precedentemente esplorato nelle ricerche svolte presso il Politecnico di Bari. È il caso dell'Osteomorphic Catenary Arch, un prototipo in scala reale di un arco catenario composto da conci reciproci, e della Volta Obliqua Truchet, progettata dal Prof. Arch. Giuseppe Fallacara.

Il materiale impiegato nel processo additivo non è la pietra e, al momento, non è possibile eguagliare le sue prestazioni strutturali con materiali naturali. Come è stato precedentemente analizzato, infatti, il cemento è il materiale più utilizzato nelle sperimentazioni di C3DP date le sue prestazioni ottimali dal punto di vista strutturale.

Il progetto però ha come focus principale non quello strutturale ma quello di indagare la reazione formale con la tecnologia all'interno di una disciplina consolidata come la stereotomia. Per questa sperimentazione è stata utilizzata l'argilla, materiale naturale, "green" (inserisci nota che specifichi che l'utilizzo di green in questa frase è per richiamare il titolo dell'opera) e storicamente impiegato nel settore edile. Nella produzione ceramica la manifattura additiva offre il vantaggio di facilitare determinate lavorazioni rispetto alla manifattura formativa



◀ Fotografia della Stereotomic Green Vault, esposta in occasione di Externa 2022 alla Fiera del Levante (Bari)

che utilizza stampi in gesso o stampi meccanici. Per la realizzazione di questo prototipo, la singolarità di ogni concio, richiederebbe un numero di stampi uguale al numero di conci e pertanto molto dispendioso. L'opportunità offerta dalla manifattura additiva di creare conci cavi in argilla ha richiamato alla memoria alcuni sistemi costruttivi come i tubuli e i caroselli, componenti cavi per la costruzione di archi e volte. I tubuli, simili a bottiglie, venivano impilati per formare gli archi, invece i caroselli, cilindrici e disposti radialmente, venivano immersi in malta per garantire la stabilità. Questi sistemi sono ancora diffusi nel sud Italia, dove i "caroselli" (detti anche "pignatte bubbole") sono apprezzati per il loro buon isolamento termico grazie alle cavità piene d'aria. Inoltre, all'inizio del Novecento, l'ingegnere Pasquale Frezza riprese questa tipologia per sviluppare un sistema costruttivo antisismico. Tuttavia, i sistemi a base di elementi fittili cavi non sono stereotomici poichè i componenti sono standardizzati e non progettati in modo da migliorare le performance statiche ed estetiche.

La progettazione del prototipo è avvenuta in maniera computazionale con Rhinoceros e il plug-in di visual scripting Grasshopper. Partendo dalla trama di Truchet è stato progettato un pattern rettangolare dove i conci sono disposti alternati orizzontalmente e verticalmente per favorire tra loro un mutuo incastro. A differenza del pattern di Truchet, è stata adottata una geometria fluida poichè le stampanti delta sono più efficienti nella realizzazione di forme curvilinee piuttosto che angolari. Dallo slittamento prodotto dalle circonferenze di base è stato definito il perimetro di un concio ripetibile nello spazio. Per passare dalla geometria bidimensionale a quella tridimensionale è stato necessario affrontare il tema del mutuo incastro: il perimetro è stato replicato e traslato lungo l'asse verticale, ruotandolo di 90°, ottenendo le facce superiori e inferiori del concio, che hanno poi permesso di connettere la geometria con il comando "loft" che ha reso possibile il mutuo incastro dei conci.

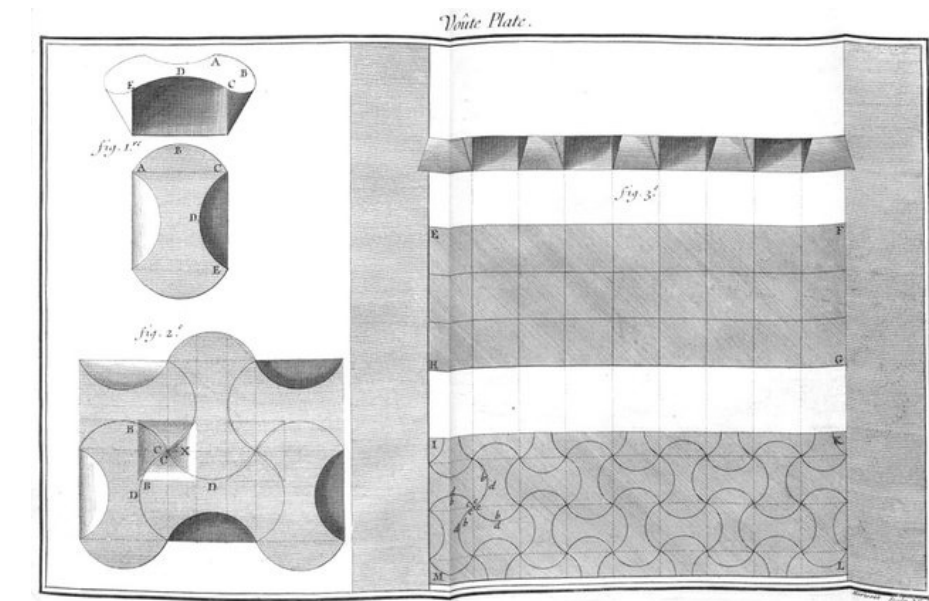
Una volta definita la fase progettuale, si è passati alla fase realizzativa. Prima di procedere con la stampa definitiva dei conci conformi alla curvatura della volta, sono stati effettuati alcuni test per calibrare la geometria, le dimensioni e le impostazioni della stampante. È stata utilizzata una stampante LDM in particolare la Delta Wasp Clay 40100. I principali parametri di stampa codificati sul software simplify riguardano il diametro del nozzle pari a 6 mm, un'altezza layer pari a 2 mm e una velocità di avanzamento pari a 35 mm/s.

I file tridimensionali sono stati importati nel software in formato STL, come da prassi, come solidi chiusi. Questo accorgimento ha consentito l'impostazione della vase mode, una specifica modalità del software di slicing, capace di creare un percorso utensile dell'estrusore, simile al percorso euleriano spiraliforme, per tutti i layer.

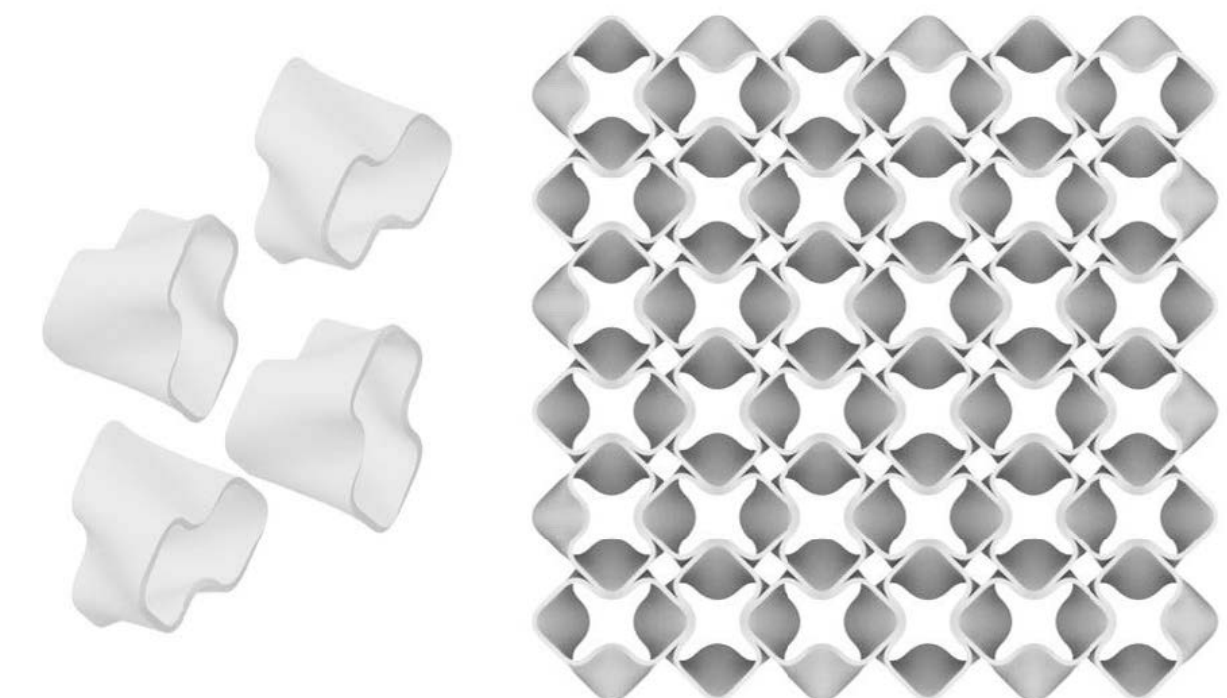
Dopo aver individuato i corretti parametri di stampa si è proceduto alla realizzazione del modello della volta a botte. Il modello ha una luce complessiva di 1,20 m e un'altezza di 50 cm e si compone di trentatré conci disposti su tre archi reciprocamente incastrati. I sei conci in corrispondenza delle estremità della volta – tre per ciascun lato – corrispondono a blocchi osteomorfi tagliati a metà, in modo che un lato si mantenga piano e possa poggiare sulle spalle lignee fissate alla base. Dopo aver definito la forma del singolo blocco sulla base delle considerazioni geometriche precedentemente descritte, si è stabilita la superficie da tassellare, una porzione di cilindro profonda quasi 40 cm e con una luce di 126 cm. Dato che la trama prevede che l'elemento osteomorfo si ripeta nello spazio orientandosi in maniera alternata lungo la direzione U e la V, e la volta a botte semplice corrisponde a una superficie a singola curvatura, si è ottenuto un modello contenente quattro famiglie di blocchi: due famiglie di conci interi e due di mezzi conci posti alle estremità. Questa semplificazione ha facilitato la produzione, nonostante la principale potenzialità della stampa 3D risieda nella personalizzazione e nella realizzazione di un'ampia va-

rietà di elementi senza spreco di materiale. Dopo aver stampato tutti i blocchi, è stato necessario un periodo di asciugatura di tre giorni, seguito da una fase di limatura per eliminare imperfezioni. Successivamente, i conci sono stati cotti in un forno professionale per ceramica. L'assemblaggio del prototipo ha presentato delle difficoltà dettate dalla geometria osteomorfa dei blocchi che non permette di realizzare la volta come in un arco tradizionale. È stato quindi adottato un sistema di centine mobili per separare le due metà dell'arco e permettere l'assemblaggio progressivo dei conci.

Per valutare la resistenza del sistema è stato effettuato un test di rottura presso Tarricone Prefabbricati, a Corato (BA). Dopo aver rinforzato l'attacco delle spalle lignee con viti autofilettanti si è proceduto a caricare progressivamente la volta. Il prototipo ha ceduto con un carico di 375 kg (3,68 kN), quindici volte il peso della volta stimato a circa 25,5 kg (0,25 kN). Questo test ha confermato l'efficacia del sistema costruttivo in termini di resistenza e sostenibilità.



◀ Disegni del brevetto originale della volta piana di Truchet



▼ Schema del pattern creato dai conci osteomorfi

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

► La preparazione dei pezzi nel forno professionale presso il FabLab Poliba



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Fotografie dei concetti cotti



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Fotografie della
Stereotomic Green Vault,
esposta in occasione di
Externa 2022 alla Fiera
del Levante (Bari)



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



4.1.2 EARTH BEEHIVE

Il progetto Earth Beehive è una sperimentazione sviluppata all'interno del laboratorio FabLab Poliba che ha visto coinvolto l'intero gruppo di ricerca⁴. Esso rappresenta un esempio di architettura innovativa in terra, che esplora nuovi linguaggi formali attraverso il design e le tecniche di fabbricazione digitale. Il fulcro di questo progetto è il concetto di tassellazione spaziale, dove le forme architettoniche sono create utilizzando un singolo elemento tridimensionale che si adatta perfettamente allo spazio, riempiendolo senza soluzione di continuità. Parliamo quindi di space-filling-polyhedra, poliedri in grado di riempire interamente lo spazio tridimensionale tramite traslazioni, rotazioni o riflessioni. La forma geometrica utilizzata per la sperimentazione è l'ottaedro troncato, una figura ottenuta tagliando le cuspidi dell'ottaedro regolare che genera una nuova forma con quattordici facce regolari: otto esagonali e quattro quadrate. La generazione dell'aggregazione dell'ottaedro troncato è stata realizzata utilizzando software di modellazione parametrica quale Grasshopper, un plug-in di Rhinoceros con l'obiettivo di creare forme altamente personalizzabili in base a funzioni e requisiti specifici.

La relazione tra forma e tecnologia in questa sperimentazione risiede nella facilità con cui si è riusciti a prototipare una cassaforma per la creazione di conci con la forma di un ottaedro troncato. In questo caso la manifattura additiva è stata utilizzata in maniera indiretta creando un cassero in cui colare il materiale da costruzione. Questo consente ai progettisti di sfruttare tutto il potenziale formale che i software parametrici offrono applicando il materiale in maniera tradizionale escludendo così i problemi legati a prove strutturali sperimentali. La produzione di casseri con forme complesse con la manifattura additiva è un'applicazione molto sviluppata nel settore edile e si colloca nel dibattito della disciplina architettonica che si confronta su quale debba essere il giusto linguaggio formale di



◀ Fotografia del Earth Beehive, esposto in occasione del XXVI Festival della Terra di Casalincontrada

un materiale, come quello viscoso, che si conforma a seconda della struttura del cassero in cui è inserito. Pensiamo alle forme che il calcestruzzo assume nelle architetture di differenti stili. Creare gli stampi con la manifattura additiva potenzia questa relazione poiché è possibile realizzare forme che l'artigianato, al tornio, difficilmente riesce a restituire.

La sperimentazione ha confermato la fattibilità costruttiva di questa geometria con un materiale come la terra cruda, nell'ambito della Self Made Architecture V – Building space with raw earth, summer school organizzata a Casalincontrada, in collaborazione con il CED Terrae, in un'area dell'Abruzzo ricca di antiche costruzioni in terra. La prima fase del progetto ha riguardato la realizzazione della cassaforma necessaria per la successiva compattazione della terra. Ogni elemento spaziale, a forma di ottaedro tronco, è stato prodotto utilizzando una cassaforma prototipata mediante la tecnologia FDM (Fused Deposition Modelling). La cassaforma è stata progettata con cura per facilitarne la sformatura dopo il riempimento e si compone di due parti, con la parte superiore è dotata di una faccia aperta per il riempimento del materiale. L'impasto è stato preparato mescolando due parti di un terreno argilloso proveniente dai calanchi abruzzesi, due parti di sabbia fine, una parte di acqua e una parte di paglia tritata. Ottenuta una miscela omogenea, questa è stata lasciata riposare per una notte. Il giorno successivo è stata versata negli stampi e compattata con uno stantuffo. Dopo tre ore di asciugatura, la parte superiore della cassaforma è stata rimossa e i pezzi sono stati lasciati ad asciugare in un'area esterna ventilata. Il montaggio del prototipo è avvenuto durante la seconda sessione dell'International Summer Academy Self Made Architecture V, che si è tenuta dal 14 al 18 settembre 2022, in concomitanza con il XXVI Festival della Terra di Casalincontrada. Utilizzando un programma compositivo sviluppato su Blender, i conci sono stati disposti affiancando le facce esagonali per formare cavità all'interno della struttura. Durante l'esperienza di cantiere, sono

emerse problematiche relative alle aperture e alle sporgenze dei conci. La massa del concio, infatti, rischiava di compromettere la stabilità della struttura. Per ovviare a queste limitazioni è stata modificata la forma introducendo internamente al concio un motivo a stella composta da cilindri cavi perpendicolari alle facce esagonali. La combinazione di due conci interagenti tra loro mediante una faccia esagonale crea uno spazio cavo continuo. Questa ottimizzazione è stata adottata per permettere l'inserimento di rinforzi all'interno del concio replicando i principi formali della tecnica antica del torchis. I materiali impiegati per rinforzare la struttura sono stati il geopolimero e il bambù. Una volta composta la struttura viene colato il geopolimero e successivamente vengono inserite le aste di bambù. Il geopolimero, una volta essiccato, funge da armatura interna, garantendo la coesione dell'intera struttura. Le aste di bambù formano una griglia interna capace di resistere alle sollecitazioni di flessione e migliorare la compattezza strutturale.

Per adattare il concio a questo nuovo design, è stato necessario modificarne lo stampo. Il file della cassaforma è stato progettato per includere cilindri e creare la stella cava. I cilindri sono disposti ortogonalmente alle facce esagonali dell'ottaedro troncato, con il cilindro centrale della stessa altezza del concio e cilindri più piccoli di dimensioni pari alla metà della distanza che intercorre tra facce esagonali opposte. La geometria della cassaforma è stata ulteriormente ottimizzata con l'aggiunta di dentelli sulle due metà, top e bottom, per evitare lo sfalsamento delle facce durante la pressatura della terra.

Con la tesi di laurea Self Made Architecture VII, Earth Beehive ha subito sviluppi tecnologici, ai fini di facilitare la produzione del concio in terra cruda, e sviluppi compositivi rispetto alla creazione di prototipi alla scala del design e del progetto di architettura.

Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Fase di preparazione del
 materiale ▲

Alla pagina seguente:
 Fotografia del gruppo di
 ricerca del FabLab Poliba
 coinvolto nelle attività
 del XXVI Festival della
 Terra di Casalcontrada ►

Fase di rimozione delle
 cassaforme ►



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Fotografia di un concio dell' Earth Beehive, esposto in occasione del XXVI Festival della Terra di Casalincontrada



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



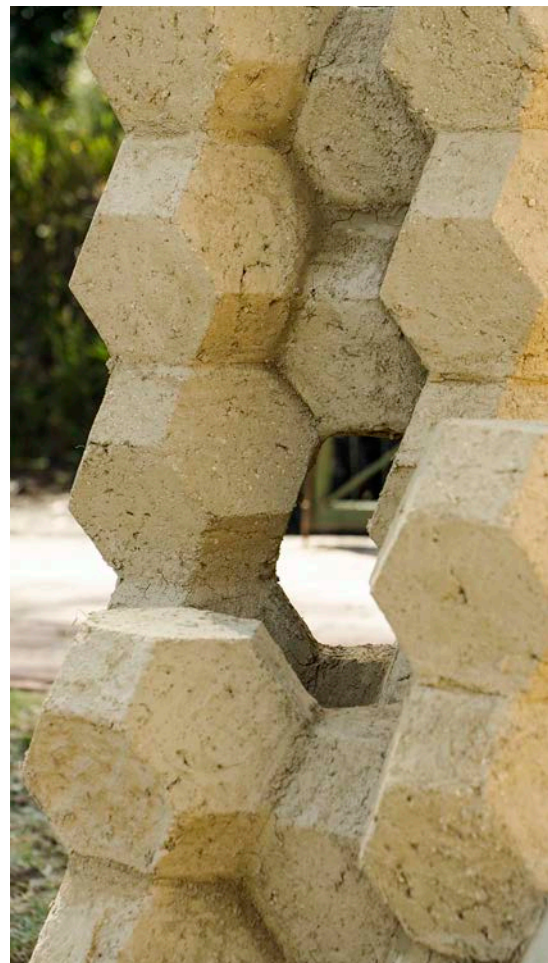
Fotografia dell'Earth Beehive, esposto in occasione del XXVI Festival della Terra di Casalincontrada

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Fotografie dell'Earth Beehive, esposto in occasione del XXVI Festival della Terra di Casalinocontrada

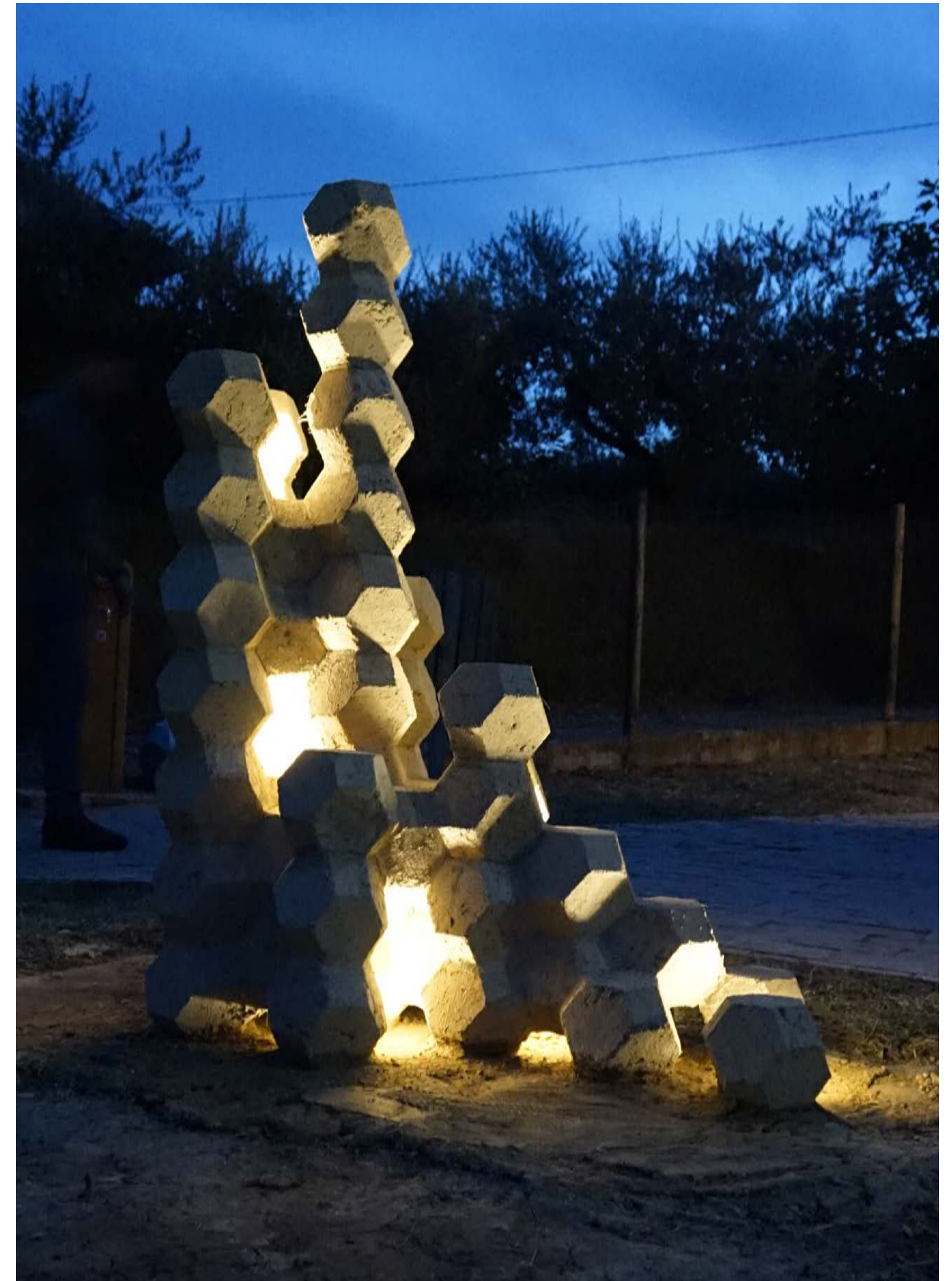


Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

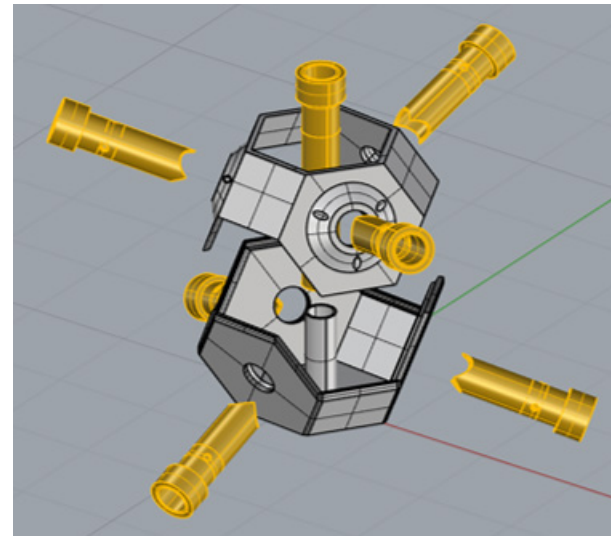
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



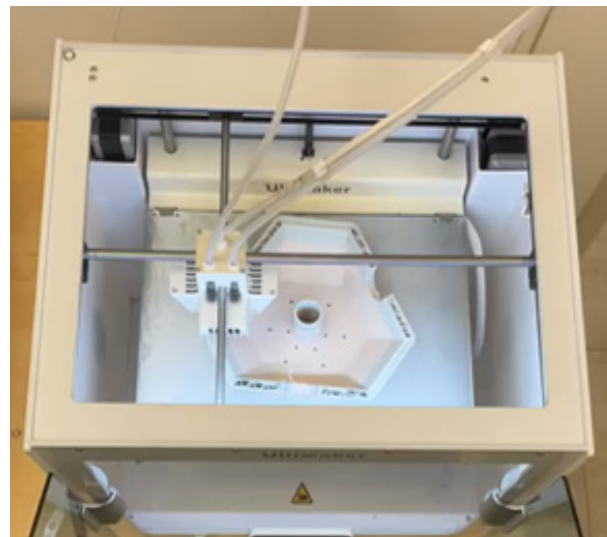
Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Modellazione
tridimensionale
dell'ultima versione di
cassaforma



Fase di stampa del
cassero



Il cassero assemblato
dopo la fase di stampa
dei suoi componenti



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

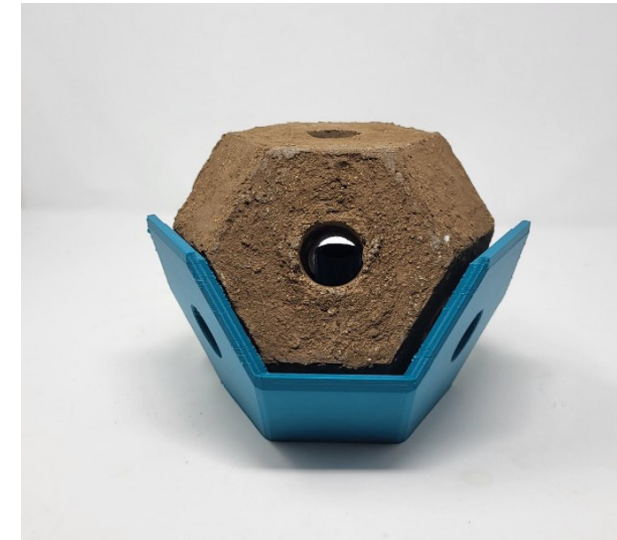
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

◀ Fase di scasseramento
del blocco

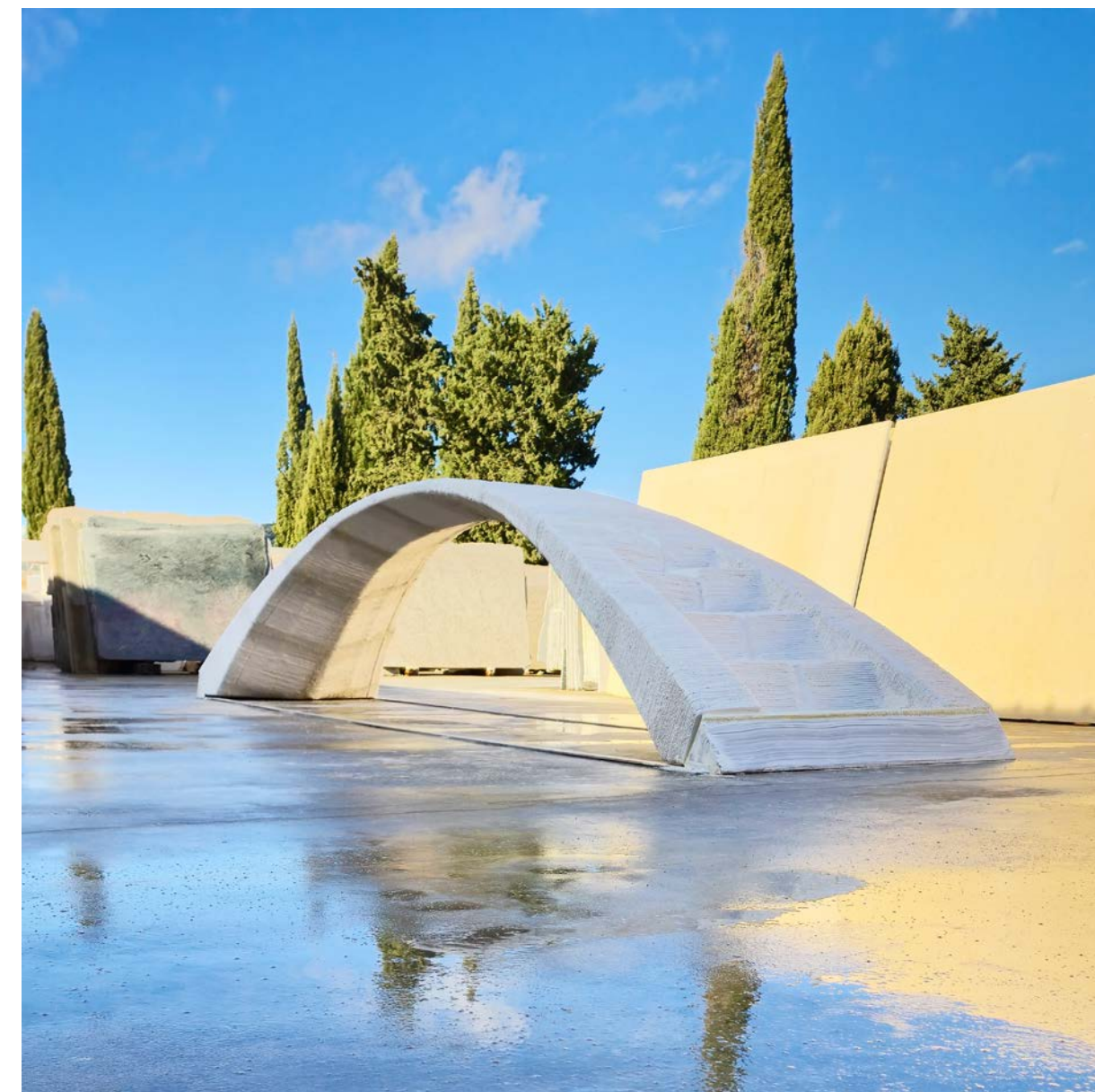


▼ Blocchi forati



4.1.3 DA VINCI'S BRIDGE

Il progetto Da Vinci's Bridge è un progetto del Prof. Arch. Giuseppe Fallacara. Per questa sperimentazione lo scrivente si è occupato dell'ottimizzazione del modello digitale per la fabbricazione additiva assieme all' Arch. Ilaria Cavaliere del Politecnico di Bari, al Dr. Mattia Morandi e al consulente Federico Monterumisi dell'azienda Wasp. Il progetto consiste nella realizzazione di un piccolo ponte pedonale ispirato al ponte progettato da Leonardo da Vinci nel 1502, il cui scopo era collegare Pera – l'attuale quartiere Galata di Beyoğlu – con Costantinopoli, odierna Istanbul. Pera era separata da Costantinopoli dal Corno d'Oro, un canale che il ponte avrebbe dovuto attraversare. Il ponte di Leonardo prevedeva un arco ribassato che si biforcava alle estremità, con una larghezza di circa 23 metri, un'altezza di 41 metri e una lunghezza di 350 metri. Il Da Vinci's Bridge segue una curva catenaria e ha dimensioni molto più ridotte con una lunghezza totale di oltre 7 metri, una luce di circa 6 metri, un'altezza di 1 metro e una larghezza di 1,4 metri nell'attacco a terra e di 70 centimetri nel concio in chiave. Per la costruzione del ponte, l'intera struttura è stata suddivisa in 13 blocchi fabbricati utilizzando la stampante Delta WASP 3MT Concrete. I blocchi sono stati poi assemblati utilizzando un sistema di centraggio temporaneo in legno e si completa di spalle metalliche collegate tramite dei tiranti. Uno dei principali aspetti distintivi del progetto è l'utilizzo di un materiale altamente innovativo ed ecosostenibile utilizzato per la realizzazione dei blocchi. Questo aspetto è stato curato dalla start-up innovativa B&Y del Dr. Vincenzo Gurrado partner del progetto coadiuvato dall'Arch. Francesco Ciriello e dell'Ing. Claudio Gallo. Esso consiste in una malta a basso impatto ambientale composta per il 30% da pietre di scarto e polveri di marmo e per la restante percentuale da un legante a base di calce. È stato necessario l'impiego di circa una tonnellata e mezzo di materiale e di oltre 22 ore di stampa effettiva. Sono stati ne-



▲ Fotografia del Da Vinci's Bridge

cessari molteplici test e studi per raggiungere il corretto mix design⁵ del materiale in modo che i parametri, necessari per essere adoperato nel processo additivo, venissero soddisfatti. I parametri in esame sono:

POMPABILITÀ, caratteristica del materiale di essere fluido abbastanza per essere trasportato nel percorso.

ESTRUDIBILITÀ, caratteristica del materiale di essere, appena depositato, viscoso abbastanza da mantenere la forma del layer stampato.

COSTRUIBILITÀ, caratteristica del materiale di indurirsi rapidamente per sopperire al peso dei layer successivi.

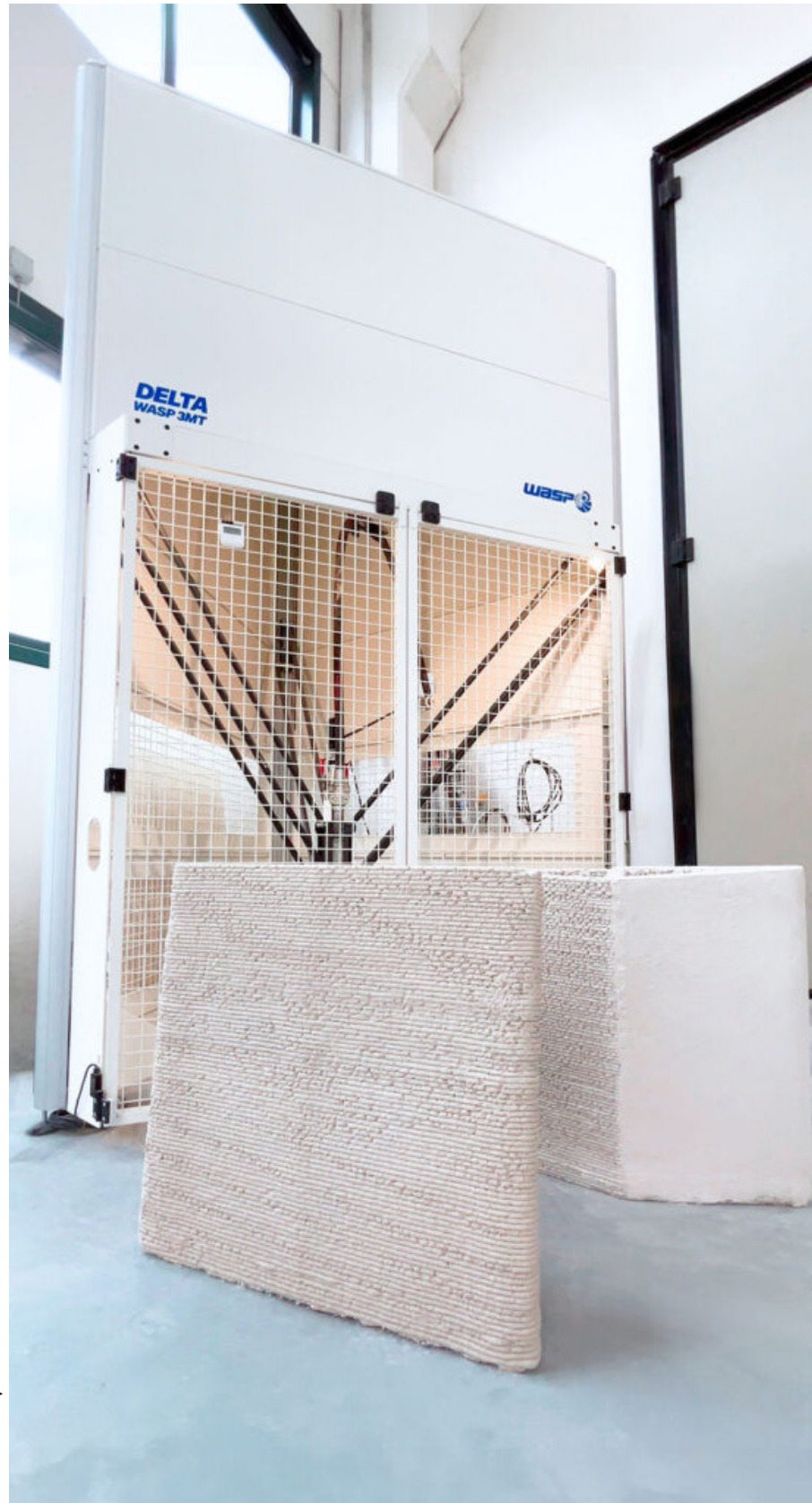
Il mix design adoperato risulta composto da un 30% di Geo-Calce Antisismico Kera Koll, un 30% di GeoCalce Tenace Kera Koll⁶, 30% di Marmettola⁷ e un 10% di acqua (dai 4,5 ai 6 litri per 30kg di polvere). La relazione tra forma e costruzione in questa sperimentazione ricade nuovamente nella declinazione della disciplina sterotomica attraverso la Manifattura Additiva, in questo caso, a differenza del progetto della Sterotomic Green Vault, l'impiego di materiale lapideo nella sperimentazione ha aggiunto un'ulteriore complessità al lavoro. Per far sì che il progetto seguisse i principi stereotomici, portando il ponte ad autosostenersi, si è codificato il percorso utensile dell'estrusore in modo che gli strati rimanessero ortogonali alle forze con layer disposti radialmente per ottimizzare la resistenza a compressione. Tecnicamente questo passaggio è avvenuto tramite il disegno su software CAD, quale Rhinoceros, del percorso macchina, poi convertito in informazioni di tipo GCode in ambiente Grasshopper attraverso l'utilizzo di un GCode exporter messo a disposizione dall'azienda Wasp. Si è quindi adoperata una stampa non planare come quella descritta a pagina 71. Si è dovuto disegnare anche l'infill dei conci utile per la distribuzione delle forze che si è conformato in tre segmenti che collegano, assecondando le isocurve longitudinali, i due perimetri esterni di ogni blocco. L'altezza del layer è di 8,5 mm. In questo caso si parla di altezza media perché, essendo i layer radiali, la loro

distanza reciproca oscilla tra un valore minimo e uno massimo. Come per la sperimentazione della Sterotomic Green Vault, si è creato un percorso euleriano tridimensionale per assicurare una migliore qualità estetica del processo di stampa. Essendo i blocchi formati da due perimetri esterni e una trama di infill interno, è stato necessario adoperare un algoritmo che unisse tutte le sezioni in un'unica spirale attraverso delle rampe, posizionate nella parte interna del blocco. Gli ulteriori principali parametri di stampa sono: il diametro dell'ugello pari a 17 mm, la velocità di avanzamento pari a 50 mm/s. Le stampe sono state ottimizzate in 7 processi per i 13 blocchi componenti il ponte inserendo due blocchi alla volta nel volume di stampa. Questo accorgimento è stato necessario per stabilizzare l'interlayer⁸ time attorno ai 3 minuti.

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Delta WASP 3MT
Concrete, tecnologia che
ha realizzato il Da Vinci's
Bridge



Alla pagina seguente:
Fase di stampa dei conci
4 e 6. È evidente nella
foto la non orizzontalità
del layer di stampa

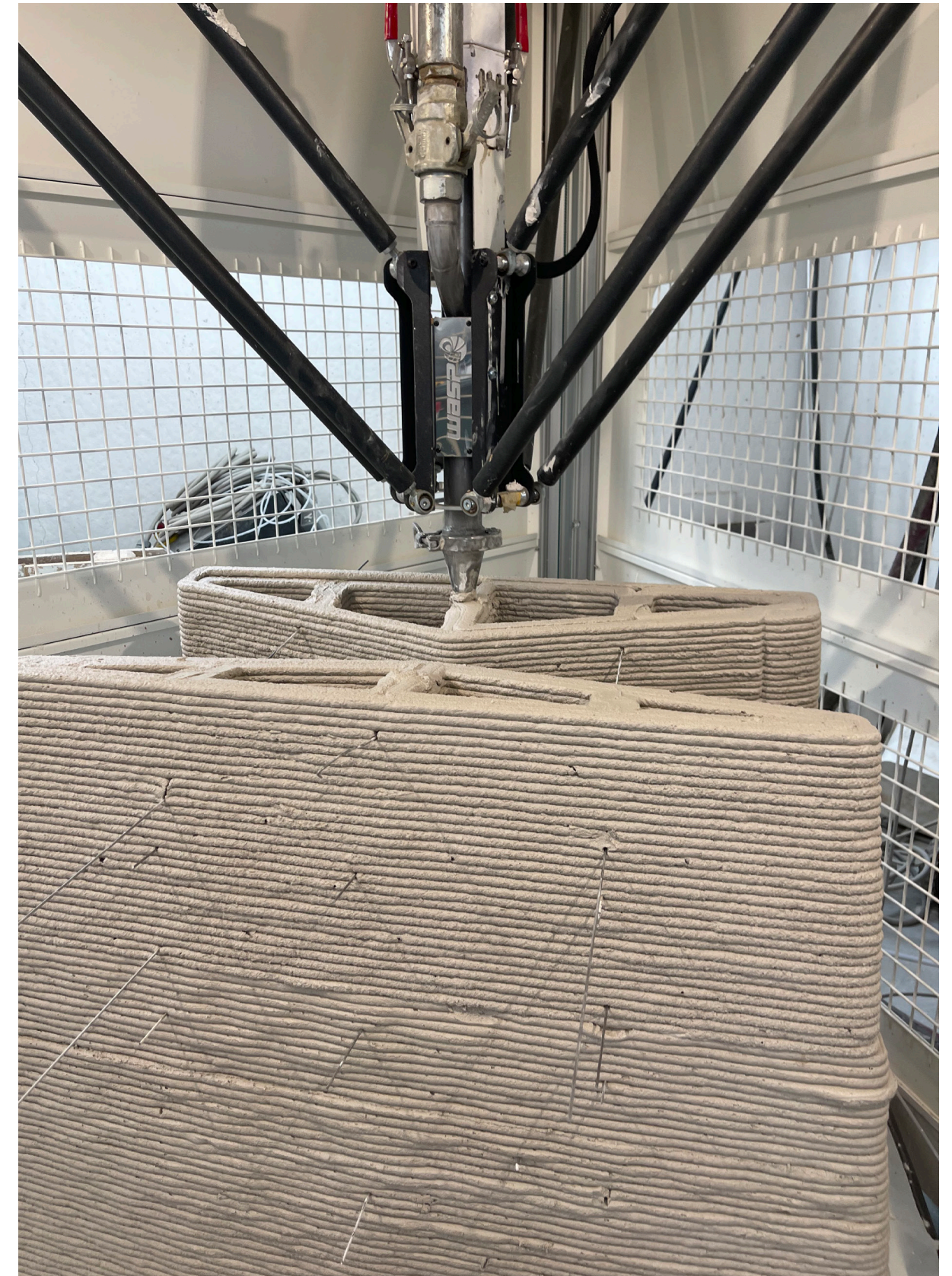
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Fotografia della fase di assemblaggio del prototipo Da Vinci's Bridge



Fotografia della fase di assemblaggio del prototipo Da Vinci's Bridge



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Fotografia della fase di assemblaggio del prototipo Da Vinci's Bridge

Fotografia della fase di assemblaggio del prototipo Da Vinci's Bridge



Angelo Vito Graziano
Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Alla pagina seguente: ►►
Plastico relaizzato in
scala 1:5 con tecnologia
FDM presso il FabLab
Poliba

Fotografia del Da
Vinci's Bridge dopo la
rimozione delle centine ▼



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



4.2 IL PERIODO DI STUDIO E RICERCA IN IMPRESA PRESSO WASP s.r.l.

La presente ricerca è stata finanziata dal Programma Operativo Nazionale 2014-2022 per la promozione della ricerca sui temi dell'innovazione. Tra gli obiettivi e le finalità attese dal programma è di primaria importanza quella di favorire l'interscambio tra mondo della ricerca e mondo produttivo. Pertanto, è stato promosso lo svolgimento di un periodo di studio e di ricerca in un'impresa italiana. L'azienda selezionata è stata Wasp s.r.l., con sede a Massa Lombarda, provincia di Ravenna. Nata nel 2012 si distingue dalle altre aziende sul territorio perché sin dalla sua nascita ha investito tempo e risorse per costruire stampanti 3D sempre più grandi in grado di estrarre materiali edilizi come l'argilla, il cemento e la terra cruda. L'obiettivo aziendale è costruire case a km0 utilizzando materiali locali e facilmente reperibili. Nel 2015, con l'intento di iniziare un programma di ricerca sulla stampa a scala architettonica, Wasp realizza la BigDelta, una stampante alta 12 metri con cui viene estruso un muro di terra cruda e paglia alto circa 3 metri. Nel 2016 presenta il Maker Economy Starter Kit, sistema di progettazione e costruzione in scala architettonica contenuto in un unico container e pensato per essere trasportato in tutto il mondo per dare forma a villaggi tecnologici costruiti con materiali locali. Nel 2018 l'azienda lancia la Crane WASP, sistema modulare di stampa 3D collaborativa. Il sistema reinterpretata, nell'ottica della fabbricazione digitale, le classiche gru da cantiere. Con quest'ultima viene costruito il primo modulo abitativo in terra al mondo: Gaia. Dal 2018 Wasp ha collaborato alla realizzazione di numerosi progetti come Tecla, Dior pop-up store e molti altri. L'attività di studio e ricerca in impresa ha avuto una durata complessiva di sei mesi, da novembre 2021 ad aprile 2022, svolti in presenza, presso la sede aziendale a Massa Lombarda, e in modalità telematica. Le attività svolte durante il periodo hanno visto la formazione volta all'utilizzo delle

stampanti di grandi dimensioni inserite nei processi di manifattura additiva a scala architettonica. Per questa specifica formazione è stato possibile utilizzare e apprendere le tecnologie della Delta Wasp 3MT Concrete e della Crane Wasp, entrambe impiegate in alcune delle sperimentazioni sopracitate. Le attività formative sono state tematizzate da due progetti. Il primo riguarda l'utilizzo della tecnologia additiva per la realizzazione di esoscheletri strutturali in cemento, ovvero dei blocchi stampati in cemento come casseforme a perdere all'interno delle quali è colato del calcestruzzo liquido; il secondo ha riguardato l'utilizzo della manifattura additiva a scala architettonica nell'iter progettuale guidato dall'Intelligenza Artificiale.

Il primo progetto, dal tenore ambizioso, ha riguardato il tema degli esoscheletri strutturali realizzati tramite manifattura additiva per la costruzione di un'opera monumentale: un moderno Colosso ispirato all'antico Colosso di Rodi. Per la prototipazione di questa scultura, l'azienda ha fornito una riproduzione tridimensionale del Colosso di cui è stata individuata una parte significativa per effettuare la sperimentazione. L'obiettivo implicito del processo della sperimentazione è la capacità di saper interpretare le forme da stampare sezionandole in modo opportuno - con la giusta inclinazione dei piani di taglio - in modo da farle rientrare nel volume di stampa massimo consentendo la riuscita della stampa tridimensionale con materiali viscosi. Si può parlare di una ingegnerizzazione delle forme stampabili. La parte individuata è stata quella della mano che regge la fiaccola perché poteva assumere un valore non strettamente correlato al Colosso di Rodi. Essa, infatti, è presente ad esempio tra opere d'arte di autori come Lorenzo Quinn, esposte di recente alla Biennale di Venezia e in generale in tutto il mondo (Support Building Bridges). In accordo con le fonti che descrivono le dimensioni del Colosso in 32 metri di altezza (70 cubati), la parte in esame risulta alta 3,82 metri. È stato effettuato un iniziale studio di ingegnerizzazione della scultura, come mostrato nella sezione tecnica, che prevede una struttura me-

tallica interna alla mano con una serie di tiranti e staffe per l'ancoraggio reciproco dei blocchi della superficie stampata in 3D. E' doveroso sottolineare come questo studio di ingegnerizzazione non sia stato verificato ulteriormente e come probabilmente non rappresenti l'unica, o forse la più idonea, soluzione per la realizzazione del progetto. La seconda sperimentazione condotta durante il periodo di studio e ricerca in impresa ha visto la realizzazione in scala reale di un blocco di "albero" architettonico con materiale cementizio. Lo scopo della sperimentazione è la validazione della C3DP per la realizzazione di opere architettoniche attraverso l'integrazione, per l'ideazione formale, dell'IA. I vantaggi attesi dall'utilizzo di tale tecnologia nel campo delle costruzioni risiedono proprio nella possibilità di invertere le informazioni - formali e strutturali - che il modello digitale presenta attraverso la fabbricazione digitale. Il blocco stampato ha un ingombro pari a 50x50 cm di base e 70 cm di altezza ed è composto dall'intreccio di tubolari free form. Data la sua conformazione, la stampa presenta punti di retrazione e pareti a sbalzo. Per la prototipazione del manufatto è stata impiegata la stampante Delta Wasp 3MTConcrete, in grado di prototipare oggetti all'interno di un volume pari ad un cilindro di 1 m di diametro e 1 m di altezza. Il materiale utilizzato è il cemento dell'azienda Italcementi Heidelberg Cement Group promotrice di impasti idonei alla stampa 3D.

A seguito della modellazione delle superfici dell'albero, eseguita sul software Rhinoceros3D, l'intero modulo è stato scomposto per rispettare il volume di stampa. Prima di avviare il processo di realizzazione, il file tridimensionale, in formato STL è stato inserito nel software di slicing Simplify3D per la generazione del percorso macchina. All'interno del software di slicing sono state inserite le caratteristiche dimensionali della stampante attraverso un pacchetto dati scaricabile direttamente dal sito dell'azienda.

I parametri di stampa utilizzati sono stati:

Diametro dell'ugello: 17mm

Altezza dello strato: 7mm

Velocità di stampa: 40mm/s

La stampa ha avuto una durata di 1 ora e 50 minuti e ha impiegato circa 75kg di materiale.

Come accennato nelle precedenti sezioni, l'ipotesi costruttiva prevede l'utilizzo dei blocchi stampati in cemento come casseforme a perdere all'interno delle quali è colato del calcestruzzo liquido. Durante il training formativo svolto in azienda è stato possibile confrontarmi con un ambiente stimolante e mettere in pratica le conoscenze acquisite, aumentando il bagaglio con nuove competenze. I sei mesi trascorsi hanno fornito dati preziosi per la presente ricerca e ne ha influenzato positivamente la stesura, consentendo di elaborare analisi più consapevoli e fondate su un riscontro diretto con la realtà professionale.

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Ricostruzione
tridimensionale del
Colosso di Rodi fornita
dall'azienda WASP



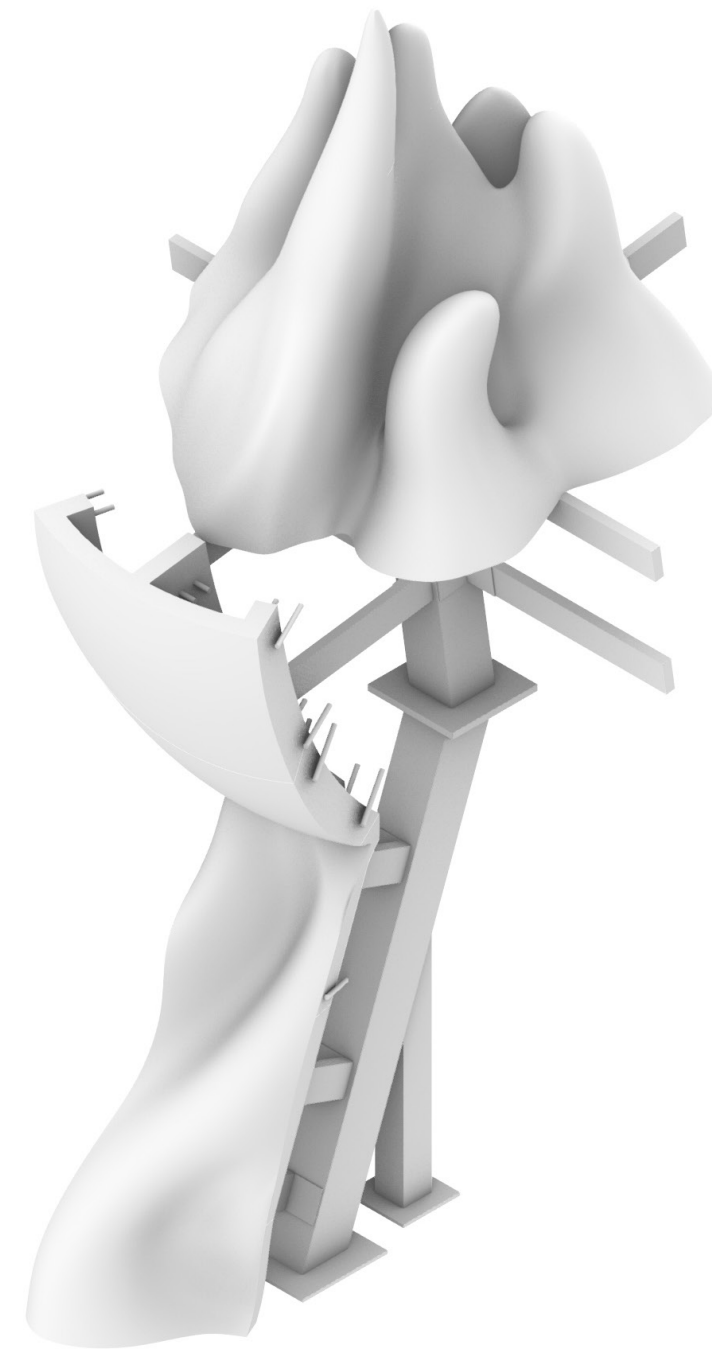
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Ingegnerizzazione
strutturale per
l'esoscheletro stampato

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

► Prototipazione
dei componenti
l'esoscheletro del
Colosso con la
stampante CRANE
WASP



► Prototipazione
dei componenti
l'esoscheletro del
Colosso con la
stampante CRANE
WASP



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

◀ Prototipazione
dei componenti
l'esoscheletro del
Colosso con la
stampante 3MT
CONCRETE WASP



◀ Prototipazione
dei componenti
l'esoscheletro del
Colosso con la
stampante 3MT
CONCRETE WASP

Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



◀ Suddivisione in
 blocchi della struttura
 alberiforme
 © IArchitettura

◀◀ Alla pagina precedente:
 Renderizzazione della
 colonna alberiforme
 © IArchitettura

▶▶ Alle pagine seguenti:
 Blocco stampato in
 cemento

Angelo Vito Graziano
Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



4.3 LA RELAZIONE TRA FORMA E TECNICA COSTRUTTIVA NELLA PROSPETTIVA TECNOLOGICA DELLA STAMPA 3D

La relazione tra forma architettonica e tecniche costruttive impiegate ha segnato l'evoluzione dell'architettura nel corso della storia, influenzando radicalmente le possibilità espressive e funzionali delle costruzioni. L'introduzione di innovazioni tecnologiche come il calcestruzzo armato ha aperto nuove prospettive nella progettazione, consentendo forme complesse e strutture di grande leggerezza, fino ad allora impossibili con i materiali tradizionali. Questo materiale che vede la combinazione di resistenza alla compressione del calcestruzzo e alla trazione dell'acciaio, ha permesso agli architetti di superare i limiti strutturali imposti dalla pietra o dal legno segnando l'arco di una nuova era fondata sulla sperimentazione formale e tecnica.

Il calcestruzzo armato, introdotto su larga scala alla fine del XIX secolo, ha permesso la creazione di edifici monumentali come ponti, cupole e torri, ridefinendo la relazione tra la geometria architettonica e le sue capacità strutturali. Il suo uso ha spinto i progettisti a sviluppare linguaggi formali innovativi, come quelli del Movimento Moderno, dove le superfici curve e gli spazi aperti divennero protagonisti. Questa sinergia tra tecnica e forma è stata un punto di svolta, dimostrando come il materiale e il metodo costruttivo potessero influenzare la creatività architettonica e le modalità di costruzione.

Oggi, la fabbricazione digitale e l'adozione della manifattura additiva rappresentano una nuova rivoluzione nella relazione tra forma e tecnica. L'additive manufacturing, in particolare, consente di realizzare oggetti tridimensionali stratificando il materiale, offrendo una libertà formale che si sposa con la precisione digitale. Questa tecnologia

risulta particolarmente vantaggiosa per la creazione di geometrie complesse e personalizzate, riducendo al minimo la necessità di stampi o modelli predefiniti. Le sperimentazioni presentate nel capitolo hanno dimostrato le possibilità che la tecnologia ha in relazione alla forma. L'utilizzo diretto e indiretto della tecnologia offre molteplici possibilità sia in ambiti applicativi specifici come la stereotomia sia in esperienze con materiali non comuni nelle costruzioni moderne come la terra cruda.

Tuttavia, l'uso della manifattura additiva nell'architettura non è un'applicazione priva di sfide. La tecnica di stampa LDM (Liquid Deposition Modeling), ad esempio, impone restrizioni a causa delle limitazioni meccanico-fisiche del materiale. La viscosità dei materiali da costruzione, come argilla e cemento, porta con sé variabili imprevedibili durante il processo di asciugatura e consolidamento, portando a ritiri volumetrici, deformazioni e imperfezioni geometriche. Questi fenomeni evidenziano l'importanza di una progettazione consapevole che integri la conoscenza delle proprietà del materiale con le esigenze della tecnica costruttiva.

La relazione tra forma e tecnica deve essere concepita come un processo interpretativo, in cui ogni scelta progettuale influisce sulle altre, dalla definizione del singolo componente alla configurazione dell'intera struttura.

In scala reale, la complessità di assemblaggio delle strutture create con manifattura additiva rappresenta un ulteriore nodo critico. La necessità di cerniere mobili o sistemi di supporto temporanei pone interrogativi sull'effettiva fattibilità economica e pratica di alcune soluzioni. Tuttavia, l'evoluzione delle tecnologie di fabbricazione digitale, combinata con una crescente consapevolezza architettonica, promette di superare tali ostacoli, aprendo la strada a un nuovo dialogo tra forma e costruzione.

L'architettura contemporanea è in una fase cruciale, dove

la ricerca di un equilibrio tra innovazione tecnologica e sostenibilità spinge i progettisti a esplorare nuovi paradigmi. L'adozione della manifattura additiva, così come avvenne con il calcestruzzo armato, ha il potenziale di ridefinire il linguaggio architettonico, trasformando il rapporto tra forma e tecnica costruttiva in un terreno fertile per la creatività e la sperimentazione. Questo approccio richiede una visione integrata, dove la comprensione delle proprietà dei materiali, delle loro limitazioni e delle loro possibilità si traduce in una progettazione consapevole, capace di sfruttare al massimo le potenzialità offerte dalle nuove tecnologie.

Note

1 Autore Arch. Nicola Parisi, editi da Edizioni di Pagina nel 2015 e 2020

2 Progetto realizzato in collaborazione con i colleghi dottorandi del Politecnico di Bari Ilaria Cavaliere e Dario Costantino.

3 La stereotomia è l'arte e la tecnica di tagliare e assemblare blocchi di pietra o altri materiali per costruire strutture complesse, come archi e cupole.

L'interesse nei confronti della stereotomia è ormai consolidato all'interno del Politecnico di Bari, dove esiste un vero e proprio filone di ricerca a essa dedicato. Questo è partito agli inizi degli anni 2000 per opera del prof. Claudio D'amato Guerrieri – fondatore della facoltà di Architettura di Bari – ed è stato portato avanti fino a oggi dal prof. Giuseppe Fallacara.

4 Il gruppo di ricerca del FabLab Poliba nasce nel 2018 contestualmente all'inagurazione Wdel centro di fabbricazione digitale del Politecnico di Bari. Il gruppo coordinato dal direttore del laboratorio Arch. Nicola Parisi ed è composto da dottorandi di ricerca e borsisti di ricerca. Le principali ricerche del gruppo vertono sullo studio e la sperimentazione di tecnologie di fabbricazione digitale applicate all'architettura e al settore delle costruzioni. Inoltre il gruppo si occupa di formazione trasversale e interdipartimentale sulla transizione digitale. In particolare: Alfabetizzazione digitale, design computazionale, automazione e intelligenza artificiale.

5 Il mix design è il processo di definizione e ottimizzazione della composizione di un materiale da costruzione (ad esempio calcestruzzo, malta o materiali innovativi), attraverso la scelta accurata di tutti i componenti (cemento, aggregati, acqua, additivi, ecc.) e delle loro proporzioni. L'obiettivo è raggiungere specifiche prestazioni meccaniche, di durabilità e lavorabilità, garantendo al contempo un uso efficiente delle risorse e un controllo dei costi.

6 In linea generica si può assumere che la geocalce antisismica consente una certa resistenza alla miscela indurita mentre la geocalce tenace essendo di granulometria minore consente di rendere più plastico il mix da stampare.

7 La marmettola è il residuo di lavorazione del marmo, prodotto durante le fasi di taglio, levigatura o lucidatura. Si presenta generalmente come una polvere o fanghiglia costituita principalmente da carbonato di calcio e altri minerali, e viene talvolta riciclata o riutilizzata in diversi settori (per esempio nell'edilizia o nell'industria dei materiali compositi) al fine di ridurre gli scarti di produzione.

8 L'interlayer time è la differenza di tempo che intercorre tra due layer consecutivi ed è un parametro fondamentale da controllare per il processo di stampa ed anche per le proprietà meccaniche quando il materiale stampato matura/indurisce. Nello specifico possiamo distinguere:

Velocità di stampa alta (basso interlayer time):

Rischio collasso di stampa, stampabilità compromissibile

Ottima adesione tra i layer

Velocità di stampa bassa (alto interlayer time):

Stampabilità migliore

Bassa adesione tra i layer (che si traduce in bassa resistenza)

5 CAMPO APPLICATIVO: IL BENESSERE OUTDOOR

Lo spazio urbano mediterraneo, risultato di secoli di evoluzione, è caratterizzato da un intreccio di fattori culturali, climatici e sociali che ne definiscono la struttura e l'uso. Le città mediterranee sono state modellate per rispondere a una serie di esigenze pratiche legate principalmente al clima, alla necessità di protezione e difesa, e a fenomeni di coesione sociale.

Un aspetto distintivo dello spazio urbano mediterraneo è la centralità dello spazio pubblico. La piazza, emblema dello spazio urbano per eccellenza, non è solo un luogo di transito o un'area di servizio, il cuore pulsante delle dinamiche sociali e politiche. Le piazze mediterranee, circondate da edifici residenziali o commerciali, sono luoghi di incontro, dove la vita quotidiana si svolge in modo informale, dove si svolgono attività pubbliche, mercati, eventi culturali e celebrazioni collettive. La disposizione delle piazze è funzionale alle relazioni sociali. La piazza è uno spazio dinamico che si adatta alle diverse necessità nel tempo e crea un senso di appartenenza e comunità. La progettazione di questi spazi si inserisce in un contesto culturale che ha sempre visto nella convivialità e nella socializzazione elementi fondamentali della vita quotidiana.

La configurazione urbana delle città mediterranee risponde anche a una profonda conoscenza del clima, e questa consapevolezza, ha influenzato l'organizzazione e l'orientamento degli edifici, spesso allineati lungo assi che accolgono ventilazione naturale e ombreggiamento, pensato per contrastare le alte temperature estive e per sfruttare al massimo le risorse naturali. Il tema della facciata è spesso affrontato con approcci formali e tecnici che contribuiscono a regolare la temperatura interna e a favorire la protezione dall'irraggiamento diretto. I vicoli stretti e tortuosi, tipici delle città storiche mediterranee, hanno la funzione di proteggere dalle alte temperature e proteggere l'intimità, ma anche di creare una connessione visiva tra gli abitanti della città favorendo l'interazione sociale.

I vicoli, le piazze e le corti non sono solo luoghi di passaggio, ma spazi sociali dove le persone si incontrano, scambiano opi-

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

nioni e partecipano alla vita collettiva. La città mediterranea è spesso vista come un'estensione della casa, dove la sfera privata e quella pubblica si sovrappongono. La protezione dalle intemperie e la ricerca di frescura sono quindi integrate con la dimensione sociale, creando una cultura che enfatizza la convivialità e la condivisione.

Infine, è importante sottolineare che lo spazio urbano mediterraneo non è statico, ma in continua trasformazione. Le città del Mediterraneo hanno una lunga storia di adattamento e resilienza alle sfide sociali, economiche e climatiche, e continuano a evolversi integrando elementi di modernità pur mantenendo una forte identità legata alla tradizione. Cercano di mantenere il loro carattere distintivo, facendo convivere antichi spazi urbani con nuove strutture e funzioni, in un equilibrio che riflette la capacità di adattamento alle nuove esigenze sociali e ambientali.

Lo spazio urbano mediterraneo è un sistema complesso e dinamico che risponde a una varietà di esigenze: protezione dal clima, creazione di relazioni sociali, conservazione delle tradizioni, e adattamento alle sfide contemporanee.

5.1 LO SPAZIO URBANO E LA MITIGAZIONE DEL FENOMENO DELL'ISOLA DI CALORE URBANO: AUMENTARE IL BENESSERE OUTDOOR

L'isola di calore urbana (Urban Heat Island, UHI) rappresenta una delle sfide più significative per la sostenibilità urbana contemporanea, in particolare nelle città mediterranee. Questo fenomeno, dato dall'urbanizzazione crescente e dalle modifiche antropiche al territorio, si manifesta con un aumento delle temperature nelle aree urbane rispetto alle aree rurali circostanti, con impatti negativi sia sull'ambiente che sulla qualità della vita degli abitanti. Gli effetti dell'UHI, quali l'aumento della morbidità e mortalità legate al caldo, la maggiore domanda di energia per il raffrescamento, l'incremento delle emissioni di CO₂ e la riduzione della qualità ambientale complessiva, rischiano di essere aggravati dai cambiamenti climatici in corso. Le città mediterranee, grazie alla loro specifica configurazione urbana e climatica, offrono un'opportunità unica per testare strategie integrate che non solo affrontino il fenomeno dell'UHI, ma che migliorino anche la qualità della vita e promuovano una maggiore inclusività sociale. La tipica morfologia urbana mediterranea, con i suoi tessuti densi, i cortili interni, le piazze e gli spazi pubblici ombreggiati, è di per sé un esempio di adattamento climatico sviluppato storicamente. Tuttavia, questi spazi possono essere ripensati come veri e propri laboratori di sperimentazione per strategie sia tecniche che sociali.

Tra le soluzioni tecniche, un ruolo di primo piano spetta ai materiali e alle tecnologie innovative per la riduzione dell'assorbimento del calore. L'impiego di materiali riflettenti (cool materials), rivestimenti fluorescenti, e asfalti capaci di ridurre l'assorbimento della radiazione solare è particolarmente promettente nelle aree urbane dense. Inoltre, l'introduzione di materiali a cambiamento di fase (PCMs) per il controllo passivo della temperatura può trovare applicazione nei contesti mediterranei, dove l'escursione termica tra giorno e notte è si-

gnificativa.

Anche l'integrazione di elementi naturali negli spazi urbani si dimostra cruciale. Le aree verdi e blu, come parchi urbani, tetti verdi, pareti vegetali e specchi d'acqua, non solo contribuiscono alla riduzione dell'intensità dell'UHI tramite l'ombreggiamento e l'evapotraspirazione, ma creano anche microclimi favorevoli migliorando il comfort termico. In particolare, le soluzioni basate sulla natura (Nature-Based Solutions, NBS) offrono vantaggi multipli: mitigazione del calore, miglioramento della biodiversità urbana e promozione del benessere psicologico degli abitanti.

L'UHI non è solo una questione tecnica, ma anche sociale. Le alte temperature non influenzano soltanto la salute fisica, ma modificano il comportamento sociale, alterando le interazioni interpersonali. La progettazione degli spazi urbani mediterranei deve quindi puntare non solo alla mitigazione delle temperature, ma anche alla creazione di luoghi capaci di favorire la coesione sociale, il benessere psicologico e le attività collettive, anche durante i periodi di calura estiva.

In questo contesto, le piazze mediterranee, con la loro funzione storica di luogo di incontro e socializzazione, possono essere ripensate come centri di aggregazione termicamente confortevoli. L'inserimento di alberature, pergolati, fontane e pavimentazioni riflettenti può trasformare questi spazi in oasi urbane, capaci di attrarre persone anche nei momenti più caldi della giornata. Tali interventi non solo migliorano il microclima locale, ma promuovono anche un uso più intenso e diversificato dello spazio pubblico.

La sfida per le città mediterranee consiste nel coniugare le innovazioni tecnologiche con il rispetto per il patrimonio storico e culturale. Molti centri storici del sud Europa, ad esempio, presentano una copertura di materiali tradizionali come la pietra che, pur avendo un'elevata inerzia termica, contribuisce all'accumulo di calore durante il giorno. In questi contesti, strategie volte all'inserimento di pavimentazioni permeabili e riflettenti

o l'uso di vegetazione verticale possono ridurre significativamente le temperature percepite, senza alterare il carattere storico degli spazi.

L'applicazione delle tecnologie digitali, come i modelli di simulazione microclimatica, consente di progettare interventi mirati e di valutare in anticipo l'impatto delle soluzioni proposte. Ad esempio, l'analisi delle correnti d'aria e delle zone d'ombra permette di ottimizzare la disposizione di alberi e strutture ombreggianti, massimizzandone l'efficacia.

Gli spazi urbani mediterranei, con le loro peculiarità climatiche e culturali, possono diventare un modello globale per la gestione e la mitigazione dell'isola di calore urbana. L'adozione di strategie integrate che combinino soluzioni tecniche avanzate, come i materiali innovativi e la digitalizzazione, con approcci sociali e partecipativi, può trasformare queste città in esempi virtuosi di adattamento climatico.

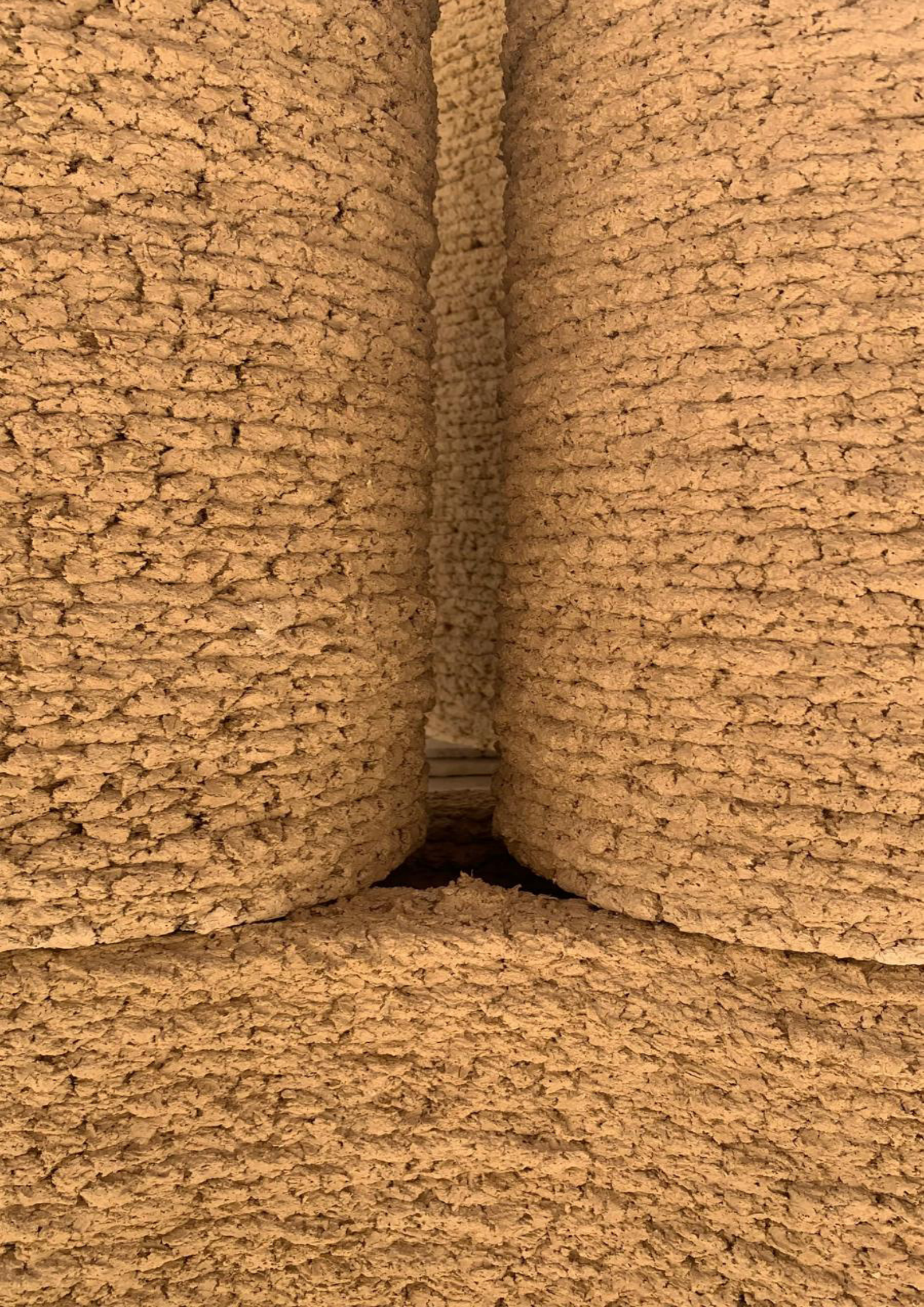
In questa prospettiva, gli spazi urbani mediterranei non devono essere visti solo come luoghi di sperimentazione tecnologica, ma anche come piattaforme per promuovere la resilienza e la sostenibilità sociale. La lotta all'UHI diventa così un'opportunità per ripensare l'intero sistema urbano, restituendo centralità agli spazi pubblici come luoghi di inclusione, benessere e innovazione.

Pertanto si è scelto di lavorare sugli spazi aperti mediterranei che assumono in questa ricerca il ruolo di campo di applicazione per testare come la tecnologia additiva possa conformare il materiale aumentando l'aspetto prestazionale così da favorire la funzione del manufatto. Ecco che quindi forma, materiale e funzione stabiliscono relazioni con il sistema produttivo.

La Manifattura Additiva, se attivata secondo l'iter più volte presentato nelle sperimentazioni di questa tesi - ovvero come tecnologia che concretizza la progettazione computazionale - ha la capacità di concretizzare coerentemente queste relazioni.

Questo sarà molto più chiaro con la descrizione del dimostratore architettonico messo a punto per questa ricerca dottorale.

Nel prototipo infatti le geometrie, prodotte in AM, rispondono contemporaneamente all'esigenza funzionale (ovvero quella di migliorare le condizioni termo-igrometriche del luogo di applicazione); all'esigenza del materiale, che quindi "disegna" angoli di sbalzo compatibili con la sua stampabilità e risponde alle esigenze estetico-formali codificate attraverso dei criteri compositivi, che rendono più performante la progettazione e che sono presentati nella prossima sezione.



SEZIONE 3

Risultati sperimentali della ricerca

6 [IN]FORMARE LA TERRA

6.1 INTRODUZIONE

[In]formare la terra prende vita da una riflessione rispetto all'etimologia e alla connotazione del verbo formare e se quest'ultimo viene dotato, o meno, di prefissi. Förmare e Införmare composti dalla stessa matrice latina – fōrmo- donano forma. Nel primo caso il verbo significa donare forma ad un oggetto, ad un materiale. Nel secondo caso il significato risiede nell'immettere conoscenza attraverso informazioni. Il gioco di parole offerto dai due verbi racchiude l'obiettivo principale di questa ricerca: dare forma al materiale da costruzione terra cruda attraverso parametri performativi assunti come input generativi. Il risultato sperimentale della ricerca consiste nella codifica di un modello utile alla progettazione di murature urbane installabili in ambiente outdoor realizzabili attraverso la tecnologia additiva del Material Extrusion con l'utilizzo di un materiale a base di terra cruda¹. Il modello è frutto dell'espressione formale consentita in relazione alla tecnica costruttiva adoperata. Ristretto il campo formale d'indagine sono presentati i criteri compositivi individuati che combinati conformano il modello a seconda delle esigenze funzionali. Di seguito, sono presentate alcune declinazioni funzionali del modello in ambiente urbano e infine è presentato un dimostratore architettonico esemplificativo realizzato a scala reale. Dall'analisi delle tecnologie di Material Extrusion per l'edilizia presenti sul mercato, emerge chiaramente che i sistemi più performanti operano in modalità off-site, riducendo la complessità legata alla costruzione monolitica in situ. Pertanto, si è scelto un approccio basato sulla prefabbricazione di componenti, successivamente montati in opera. Tutte le tecnologie di Material Extrusion che utilizzano materiali viscosi nel loro processo condividono un elemento cruciale: il sistema di pompaggio del materiale. Questo sistema spinge il materiale viscoso all'estrusore e garantisce un'erogazione omogenea dello stesso. Uno dei sistemi più diffusi e accessibili è quello sviluppato e brevettato dall'azienda WASP

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

sotto il nome di tecnologia LDM: Liquid Deposition Modeling. Il sistema è stato scelto come tecnica costruttiva per la realizzazione del dimostratore finale in particolare con l'utilizzo della stampante Delta Wasp 3MT Concrete. Nel modello disponibile per la sperimentazione, il sistema di estrusione LDM WASP Extruder XXL è alimentato attraverso uno specifico sistema di pompaggio in continuo, costituito da una pompa e un apposito tubo di trasporto del materiale. La portata del materiale è controllata attraverso un sensore di pressione collegato all'ingresso dell'estrusore, in grado di rilevare continuamente la pressione e, di conseguenza, la portata del materiale in uscita per ottenere le migliori condizioni di estrusione. Attraverso la centralina di controllo della pompa è infatti possibile impostare tutte le variabili di pompaggio a seconda della tipologia del materiale e della consistenza dell'impasto. Tuttavia, la lunghezza del tubo e la viscosità del materiale possono causare tempi di latenza tra il rilevamento di una errata pressione in uscita del materiale e l'avvio del sistema di pompaggio compromettendo il risultato estetico dell'oggetto stampato. Per far fronte a questi problemi, il modello codificato è stato realizzato attraverso un processo di stampa continuo, senza punti di retrazione del materiale. I software di slicing tradizionali permettono di codificare questa modalità tramite l'attivazione di specifiche impostazioni quali la stampa del contorno esterno con movimento spiraliforme che ottimizzano il toolpath dell'estrusore attraverso la creazione di un percorso di stampa euleriano. Il percorso euleriano permette di effettuare la stampa di un unico perimetro dell'oggetto con un collegamento spiraliforme tra i layer. Nel modello presentato i blocchi sono stati progettati come contenitori e quindi realizzati mediante la stampa del solo perimetro esterno. La dimensione del diametro dell'ugello e la viscosità del materiale hanno influenzato la progettazione favorendo la definizione di forme organiche e continue anziché spigolose e squadrate. I blocchi prefabbricati sono quindi composti da sezioni circolari o archi di circonferen-

za. Un ulteriore aspetto chiave del processo riguarda la definizione di regole per aprire la maglia muraria. Poiché il processo additivo si basa sulla sovrapposizione di strati, è necessario che ogni strato abbia un'ampia superficie d'appoggio sul layer precedente per evitare il collasso del materiale durante la fase di stampa. Questo passaggio risulta importante con i materiali viscosi, che non si solidificano immediatamente, ma rimangono umidi fino all'essiccazione. Per questo motivo, è stato deciso di non includere sistemi di copertura, limitando il modello ai possibili sbalzi che le tecnologie come la Delta Wasp 3MT Concrete, progettate per una stratificazione orizzontale, possono gestire. I sistemi di estrusione montati su robot, con la possibilità di modificare l'angolo di estrusione, consentirebbero sbalzi maggiori, ma non sono stati utilizzati in questo contesto. In sintesi, la relazione tra forma consentita e tecnologia costruttiva dà vita a murature prefabbricate, composte da blocchi circolari con sbalzi progettati per creare aperture visive e attraversamenti delle murature stesse.

Note

¹ Il modello progettuale e le speculazioni tecnico formali correlate sono il frutto di un lavoro condiviso con il Prof. Nicola Parisi e rappresentano uno dei risultati più recenti di un lavoro di ricerca incentrato sull'aggiornamento formale dell'architettura in terra.

6.2 CRITERI COMPOSITIVI

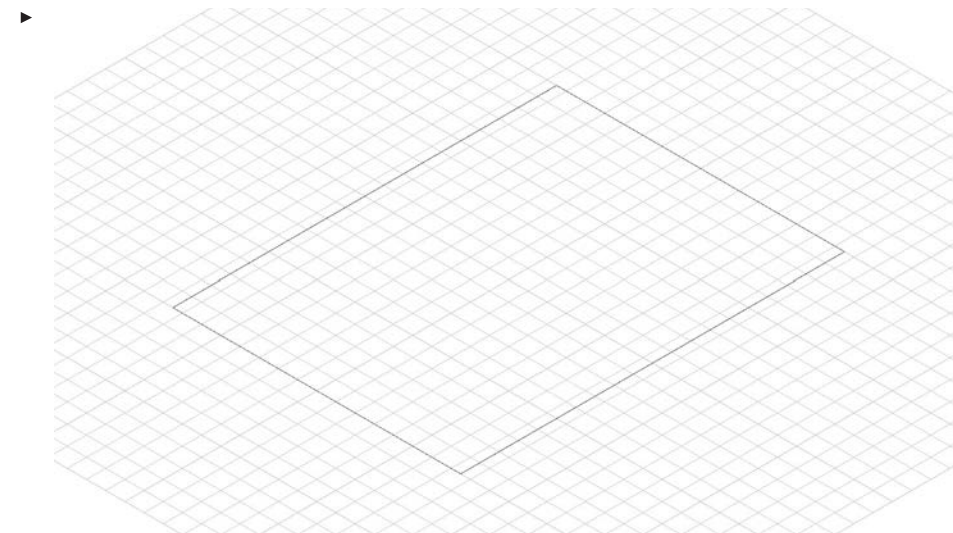
I criteri compositivi in architettura sono le regole, i principi e i metodi che guidano l'organizzazione e la progettazione degli spazi, delle forme e delle strutture architettoniche. Questi criteri governano l'equilibrio estetico, funzionale e strutturale dell'architettura. Sono essenziali per definire lo stile, il linguaggio e il carattere di un'opera architettonica. Essi intervengono nel processo di definizione formale consentendo al progettista di giungere a differenti configurazioni. Il flusso progettuale messo a punto per la definizione del modello è oggi governato dal susseguirsi di precisi step che consistono in successioni di operazioni di disegno e modellazione tridimensionale. Tali step hanno una processualità che può essere tradotta in un algoritmo di generazione formale che in questo caso è stato elaborato in Grasshopper, plug-in di visual scripting del software Rhinoceros3D. La sequenza delle operazioni è così descritta:

Step 1: È definita la sezione planimetrica del muro.

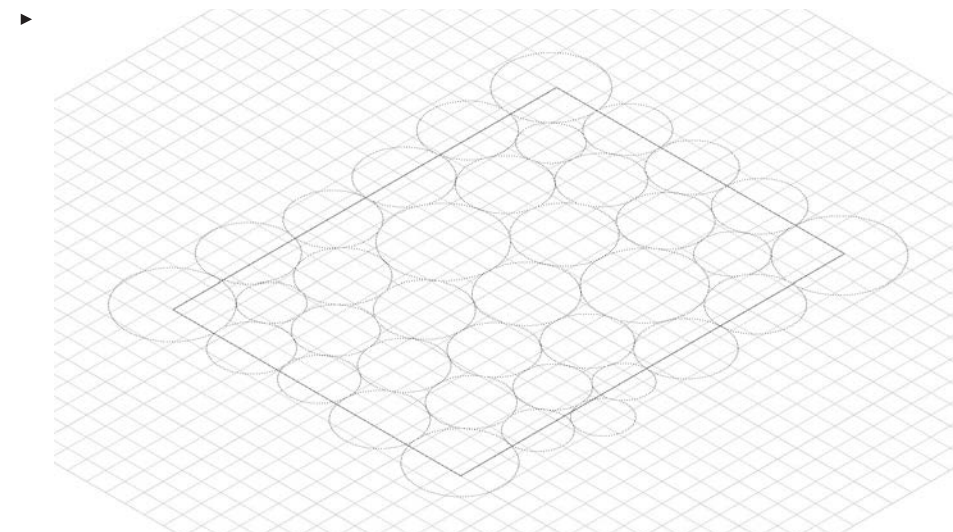
Step 2: La sezione è popolata da circonferenze tra di loro tangenti. Il raggio di tali circonferenze può essere costante o variato a seconda di input estetici o a seconda di interpretazioni di parametri performativi come, ad esempio, i dati climatici del luogo di installazione.

Step 3: Le circonferenze sono tra di loro aggregate a seconda dell'area di stampa a disposizione per la fabbricazione del prototipo. Nel caso del modello presentato si è tenuto conto dell'area di stampa della tecnologia Delta Wasp 3mt Concrete che risulta essere pari ad un cilindro con diametro un metro e altezza un metro. L'aggregazione tra le circonferenze è un passaggio cruciale per la resa estetica del modello di muro messo a punto. Essa si ottiene attraverso la realizzazione di curve poliarco chiuse che collegano le circonferenze principali utilizzando archi di circonferenza tangenti. Per consentire una efficiente permeabilità del muro stampato al passaggio dell'aria e per ovviare a problemi di tolleranza in fase di giustapposizione

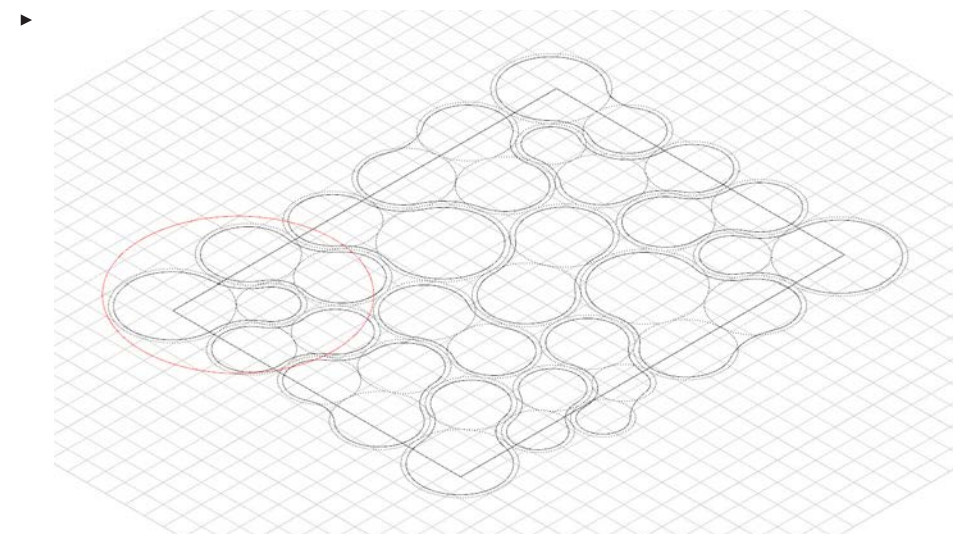
Step 1



Step 2



Step 3

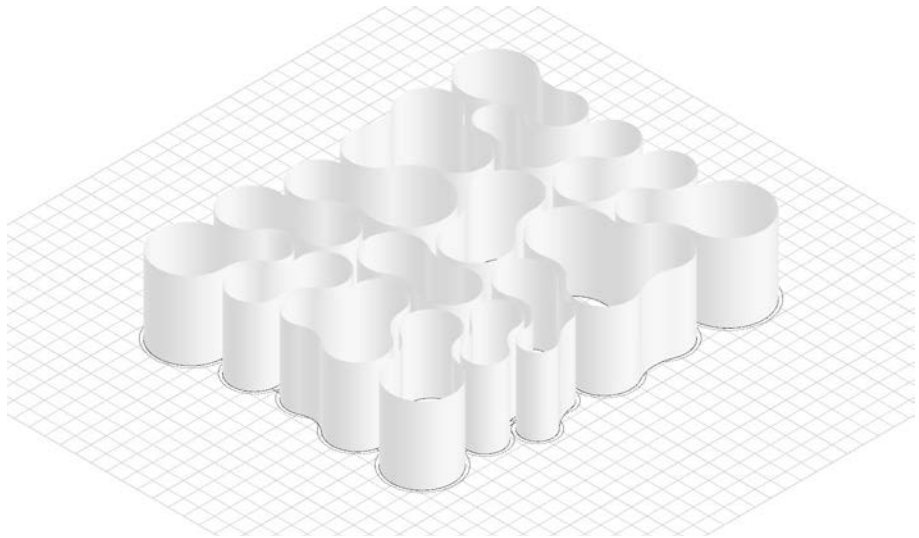


dei blocchi, il perimetro esterno dei blocchi è più piccolo rispetto alla dimensione della circonferenza di base del pattern. Step 4: Una volta create le curve poliarco che identificano un blocco esse sono estruse nella direzione verticale z a creare un solido chiuso. L'altezza presa in considerazione per la realizzazione del modello presentato può variare da un minimo di 10 cm ad un massimo di 90 cm.

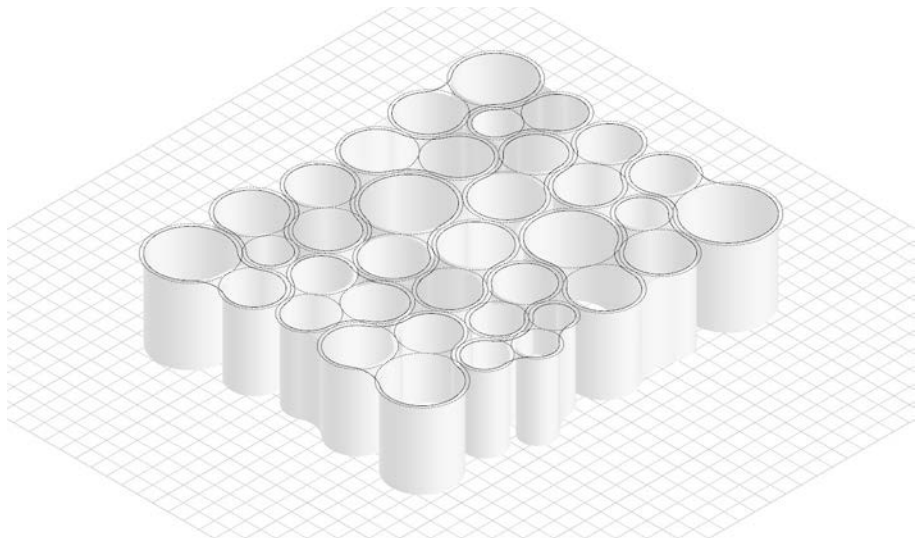
Step 5: Ottenuto il primo livello di blocchi, a seconda dell'altezza da raggiungere con l'elemento murario, l'operazione viene ripetuta per i successivi livelli utilizzando le stesse circonferenze di base ma variando le circonferenze che vengono aggregate in modo tale da creare un ammorsamento tra i blocchi nei diversi livelli.

Come intuibile dalla descrizione dei passaggi logici per la generazione formale del modello, si possono individuare tre parametri compositivi tra loro interconnessi: scala, posizione e altezza. Un ulteriore parametro compositivo riguarda l'apertura della maglia muraria. Per il dato compositivo della scala, il riferimento dimensionale riguarda il raggio della circonferenza del pattern planimetrico utilizzato per popolare la sezione muraria definita. Esso può assumere un valore costante restituendo un pattern di circonferenze tra loro tutte uguali ed un valore variabile assumendo due o più valori differenti. Per la posizione il parametro fa riferimento alla gerarchia che si crea nella reciproca posizione delle circonferenze che popolano la sezione planimetrica del muro. Le circonferenze, infatti, possono allinearsi secondo una tangente esterna alla sezione muraria, secondo una tangente interna, secondo un allineamento dei centri oppure posizionandosi in maniera casuale sul piano bidimensionale, seppur rispettando la condizione di tangenza reciproca, risultando completamente disallineate tra loro. Nel caso del parametro compositivo dell'altezza, la dimensione fa riferimento al blocco già conformato. I blocchi possono assumere un'altezza costante per ogni livello del muro, un'altezza che varia al variare del livello ed un'altezza mista in cui i cilindri

Step 4

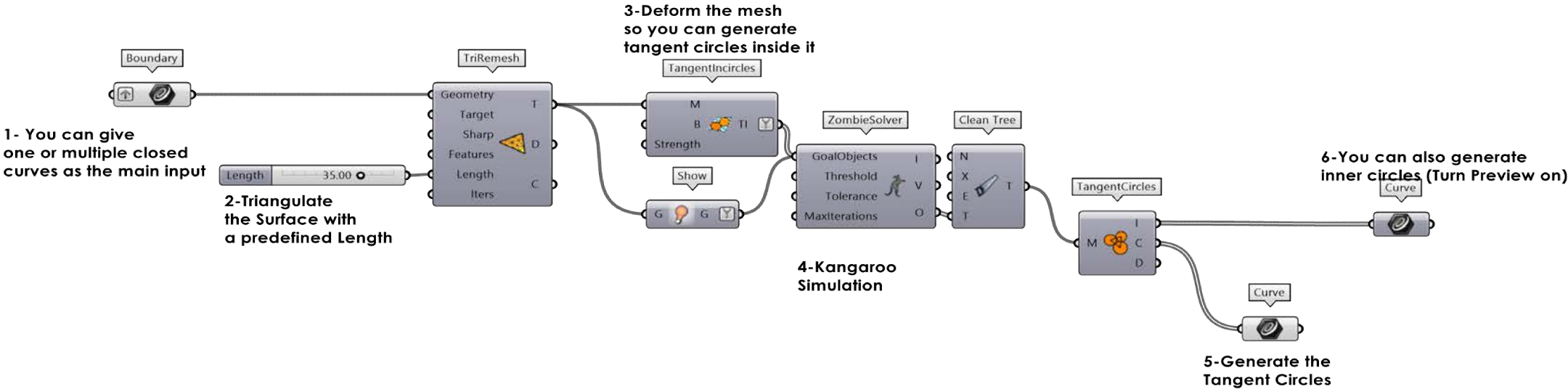


Step 5



che compongono ogni blocco assumono differenti altezze rispettando comunque le ottimali condizioni di stampa. L'apertura della maglia muraria invece può avvenire per la creazione di un varco, e quindi essere aperta, oppure può avvenire per agevolare un traguardo visivo e quindi essere chiusa. Entrambe le variabili possono risultare singole o doppie a seconda che agiscano su uno o due filari di blocchi.

Di seguito sono presentate delle tavole che mostrano le variazioni formali generate dalle interpretazioni dei criteri compositivi mostrando i risultati in planimetria e in prospettiva. Guida alla comprensione delle numerose varianti generate è una matrice ottagonale che consente la gestione delle variabili dei criteri compositivi adoperati per la configurazione presentata.



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

► Alla pagina corrente e alle pagine seguenti:
Fotografia delle fasi di assemblaggio e montaggio di blocchi stampati in scala in argilla utilizzati per verificare e sperimentare il corretto funzionamento del modello messo a punto



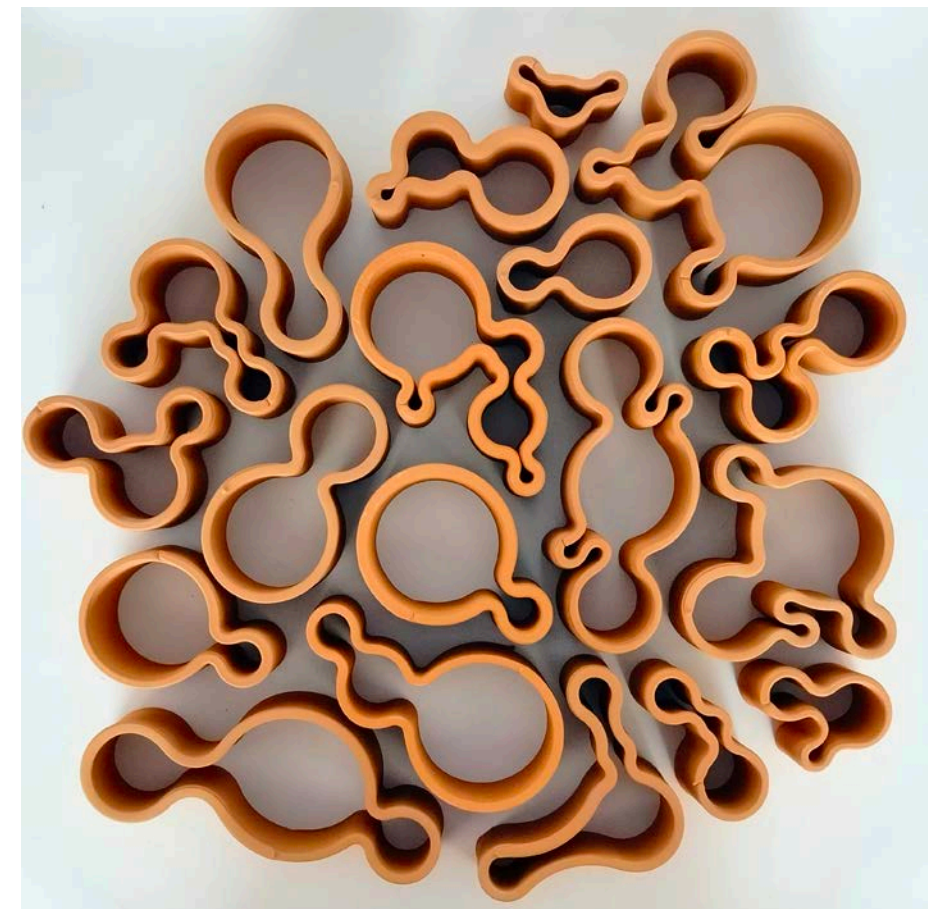
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

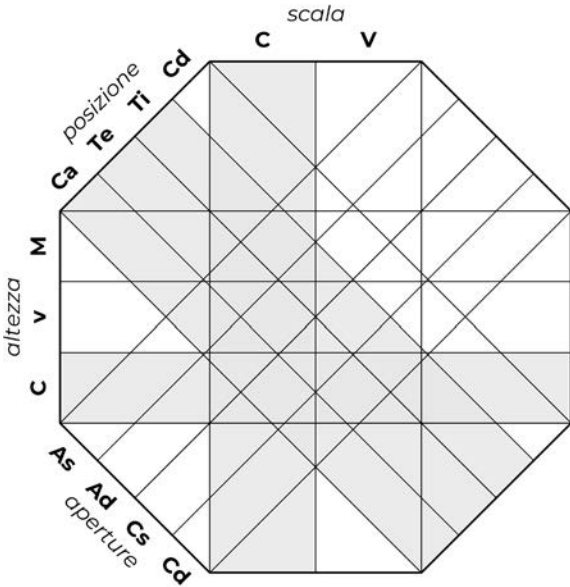
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



6.2.1 SCALA

La dimensione del modulo base ovvero la grandezza del raggio della circonferenza che compone il pattern planimetrico di circonferenze tra loro tangenti può assumere due varianti. Una costante in cui tutte le circonferenze hanno lo stesso raggio, l'altra variabile in cui dato un range di riferimento dettato dalle caratteristiche della tecnologia produttiva, le circonferenze possono assumere da due a più valori. Le tavole che seguono mostrano due configurazioni in pianta e prospetto del modello del muro in terra in cui la dimensione del raggio delle circonferenze è costante ma con due valori distanti tra loro, uno raggiunge quasi il massimo valore possibile ovvero 50 centimetri di diametro, il secondo è più contenuto pari a 25 centimetri di diametro. Successivamente sono mostrate due configurazioni con una dimensione del modulo base che varia. La prima variante è frutto dell'assegnazione di due possibili valori del raggio delle circonferenze, la seconda invece mostra un risultato in cui tutte le circonferenze assumono un valore del proprio raggio sempre diverso.

TAVOLA COMPOSITIVA 1
scala costante



◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; V variabile
posizione:
Ca centri allineati; Te tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; Cd centri disallineati
altezza:
C costante; V variabile; M mista
aperture:
As aperta singola; Ad aperta doppia
Cs chiusa singola; Cd chiusa doppia

▶▶ Alla pagina seguente: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

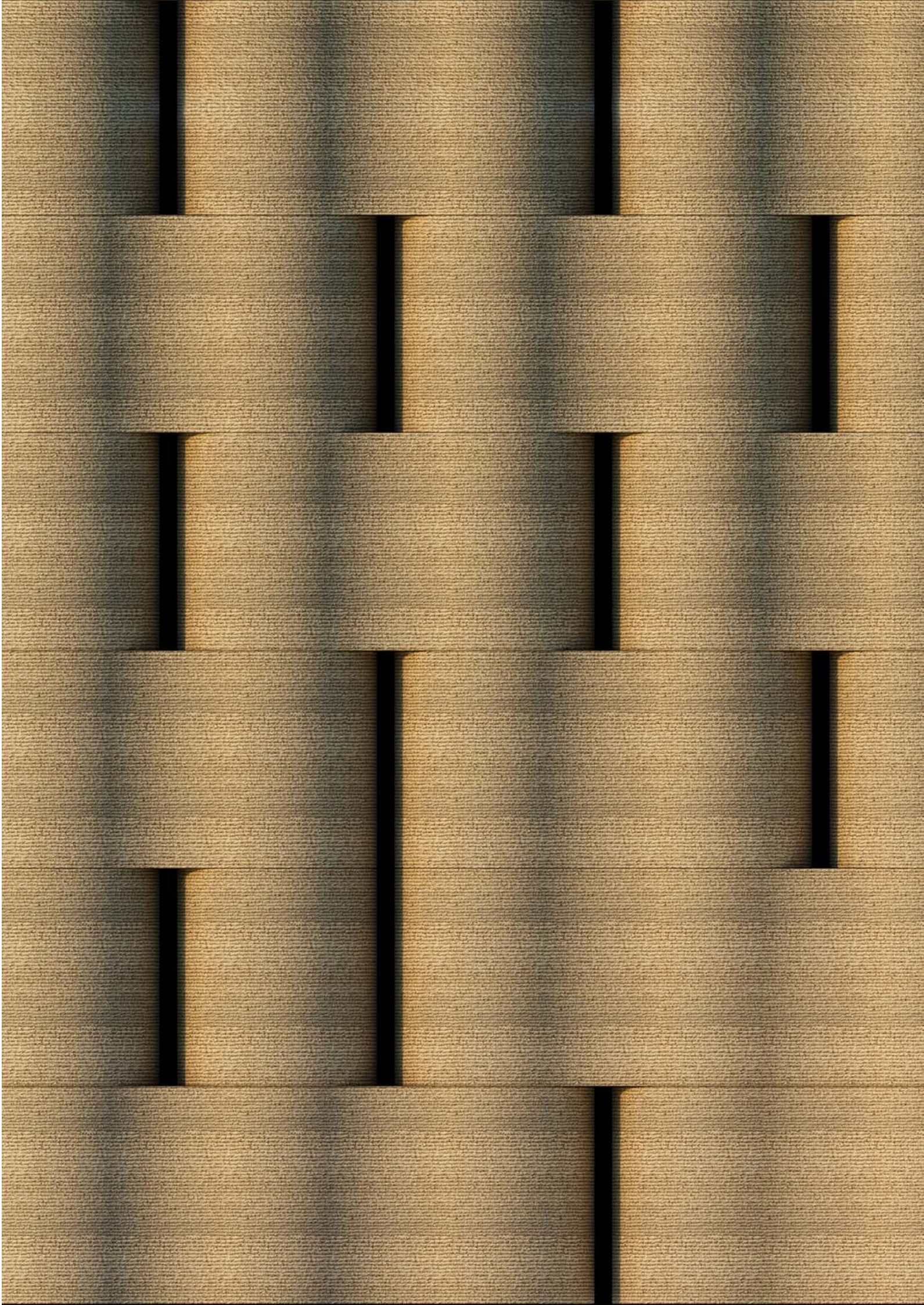
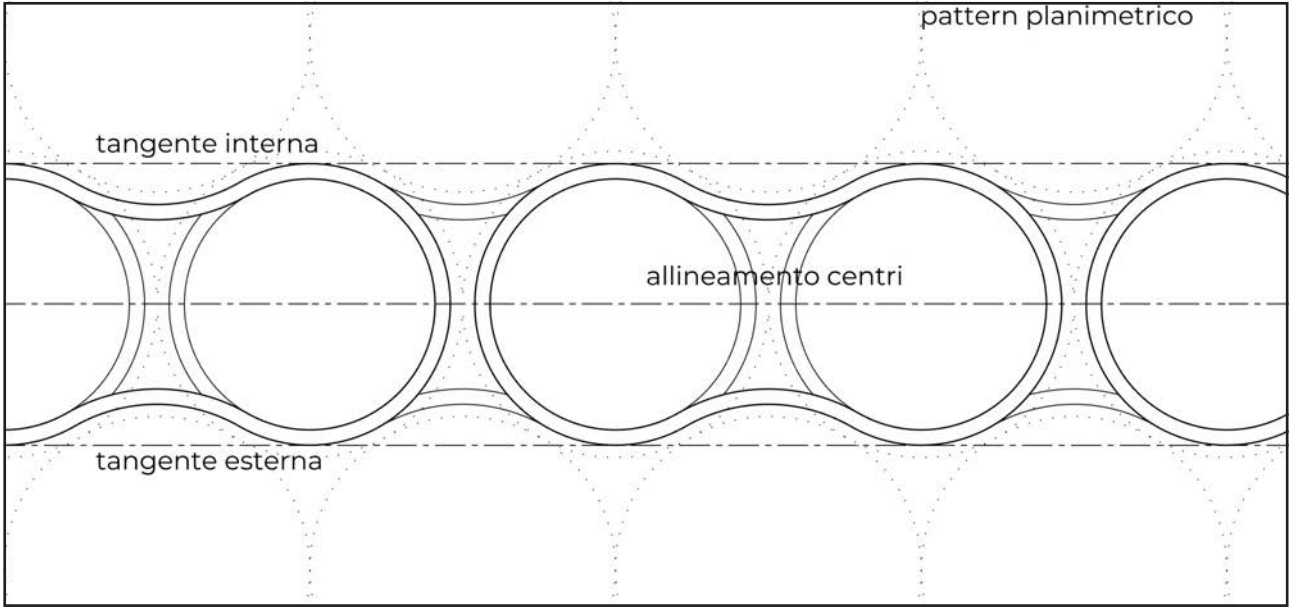
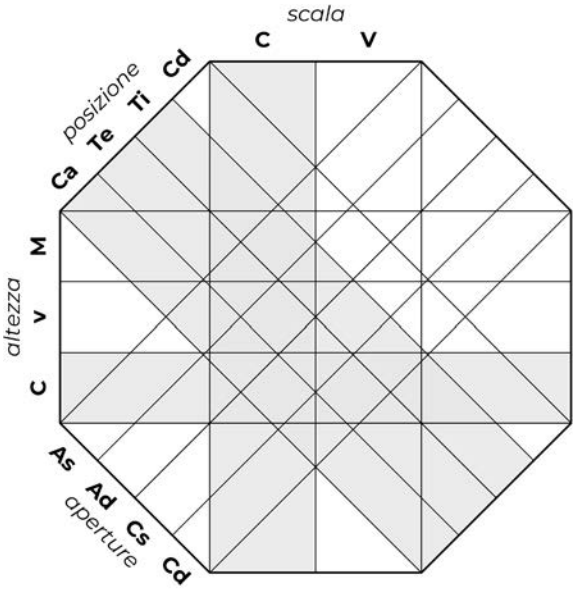


TAVOLA COMPOSITIVA 2

scala costante



◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; **V** variabile
posizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

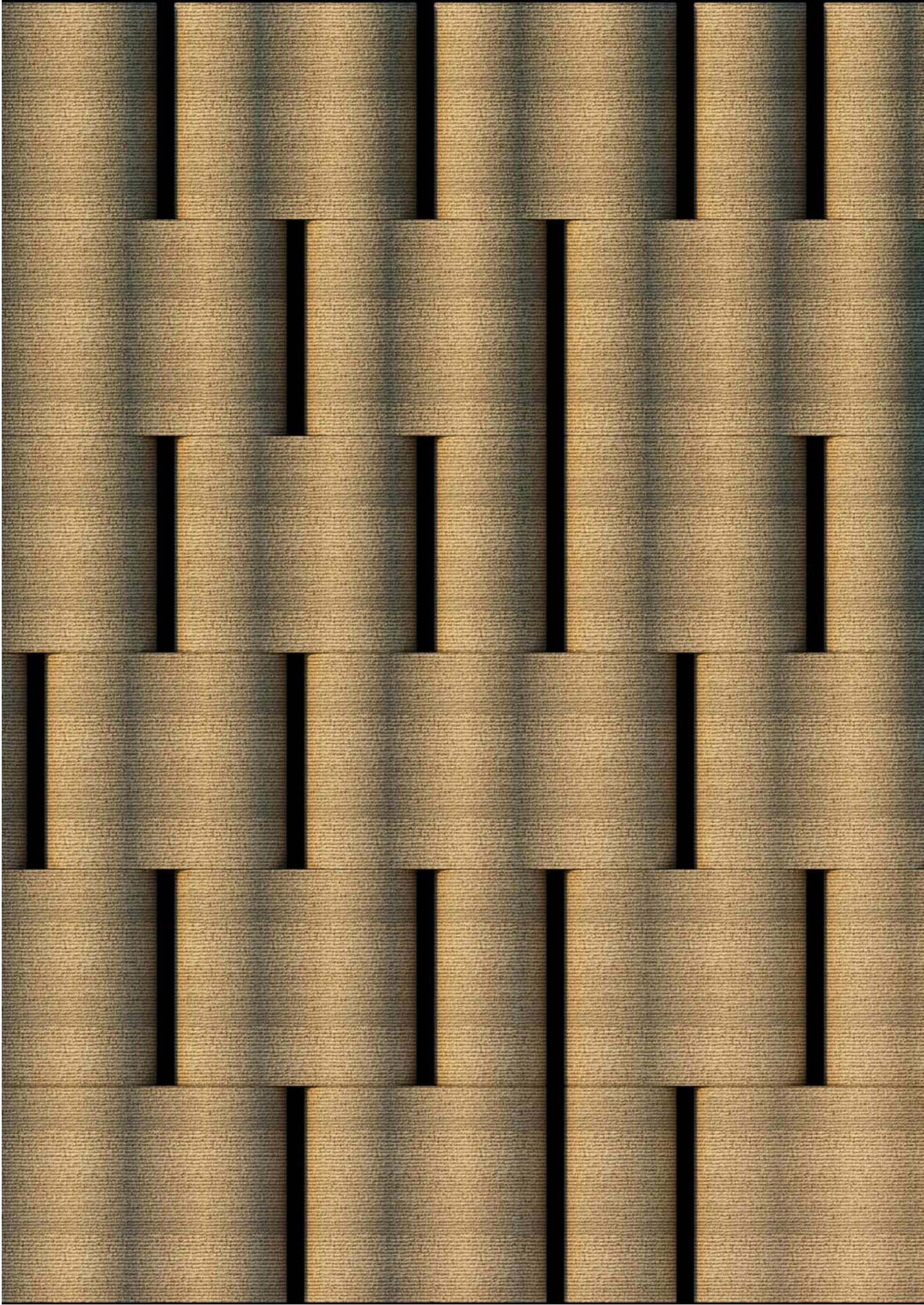
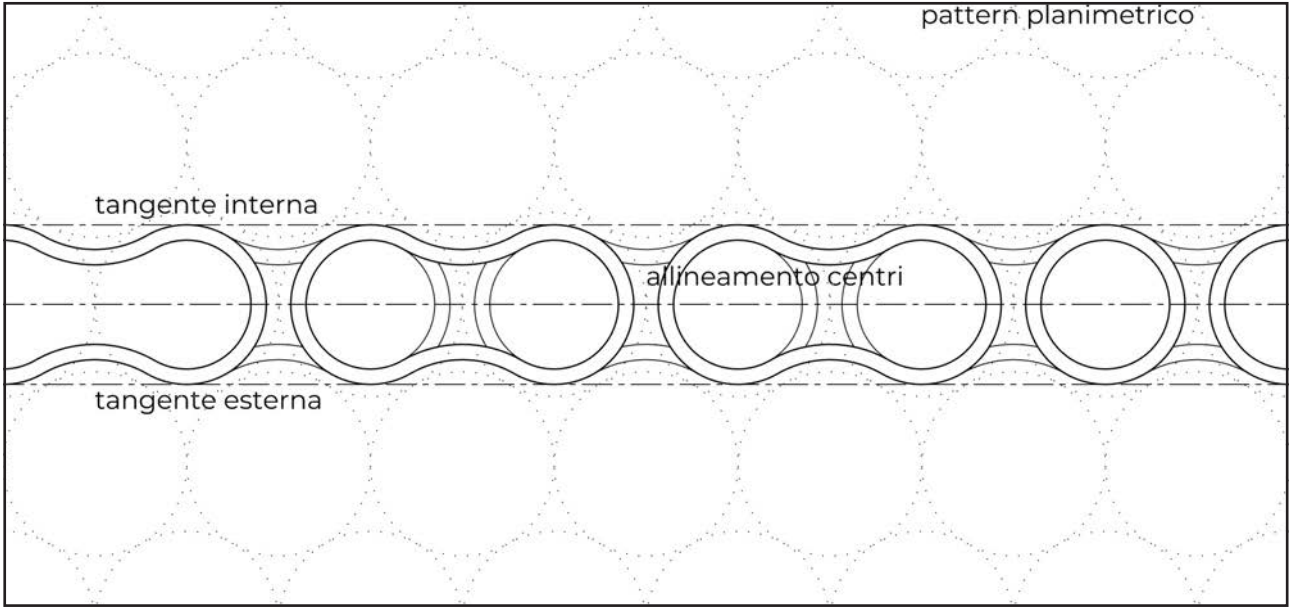
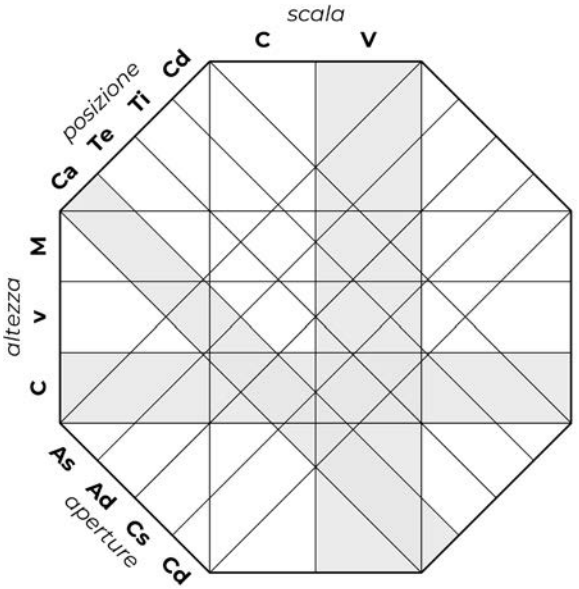


TAVOLA COMPOSITIVA 3
scala variabile



◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; **V** variabile
posizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

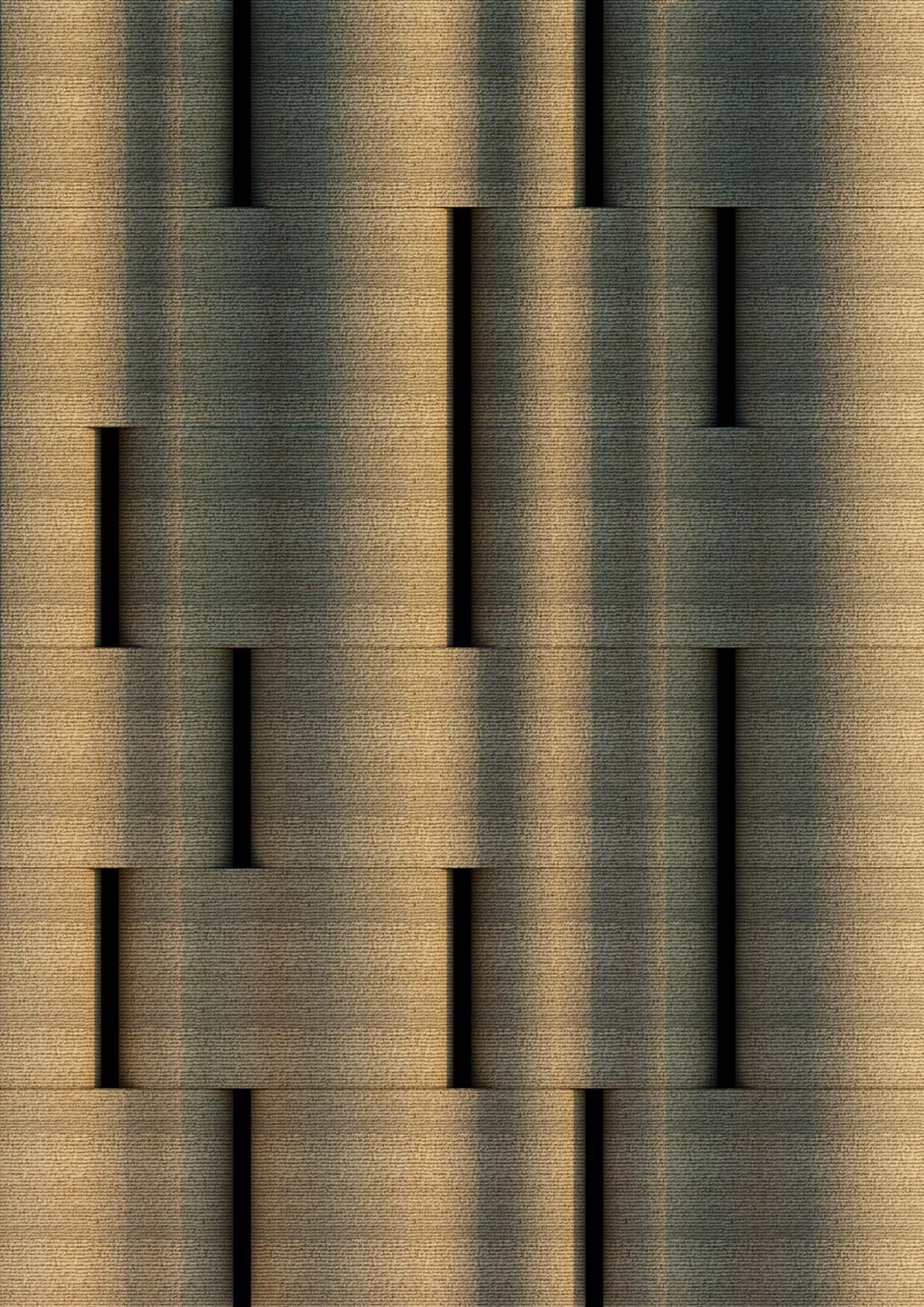
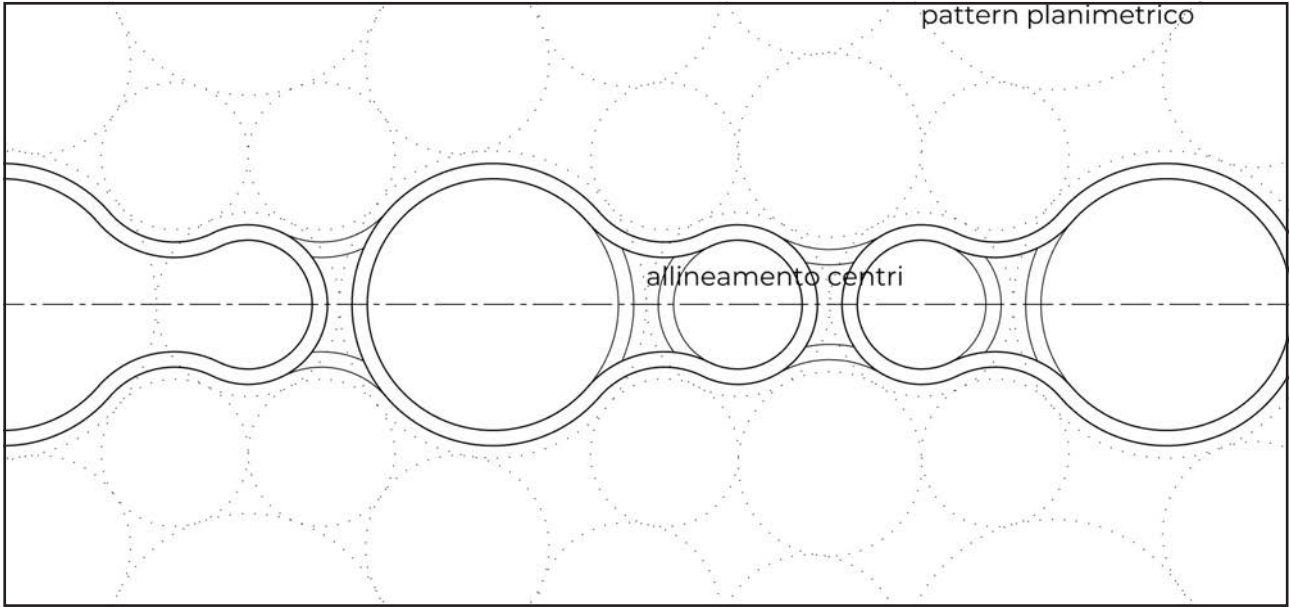
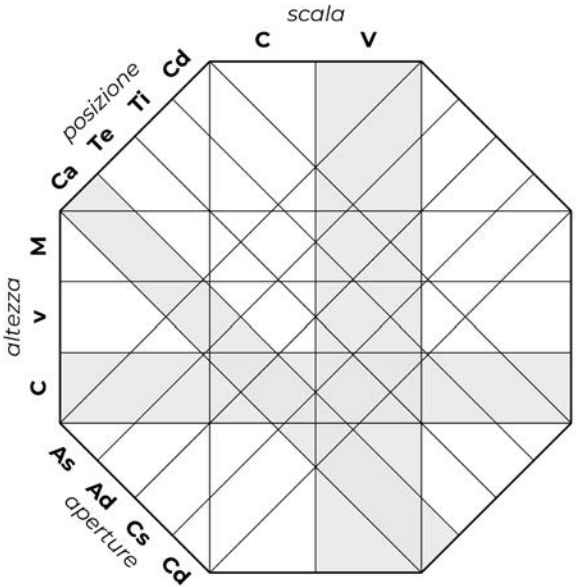


TAVOLA COMPOSITIVA 4
scala variabile



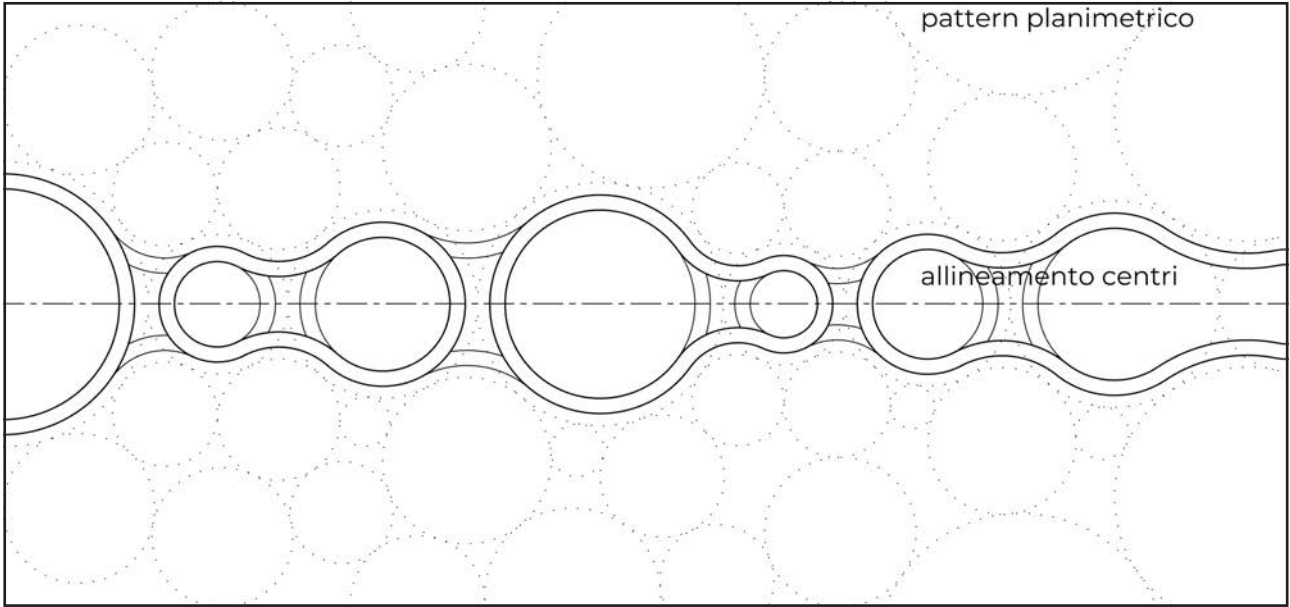
◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:
C costante; **V** variabile
posizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

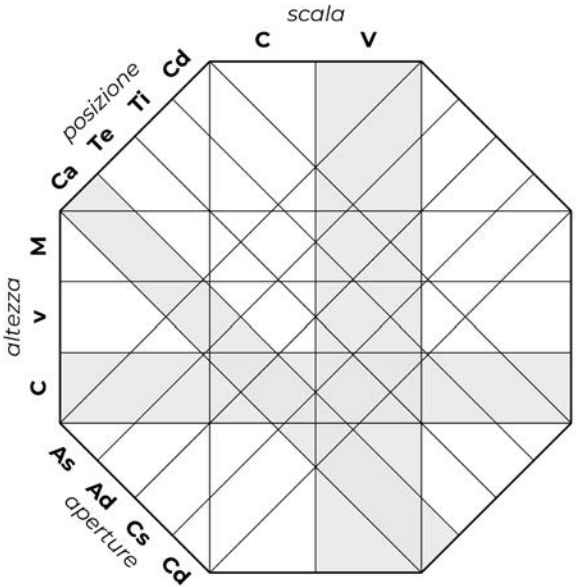
▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.



6.2.2 POSIZIONE

La posizione reciproca delle circonferenze del pattern planimetrico costituisce un criterio compositivo. Se semplificando ipotizzassimo una sezione muraria planimetrica composta da una sola fila di circonferenze, è facilmente comprensibile come la loro posizione reciproca possa assumere quattro varianti. In primo luogo, esse potranno essere tangenti ad una retta esterna al volume delineato dal muro. La seconda variante prevede, viceversa, la tangenza ad un'unica retta interna al volume delineato dal muro. Allineando invece i centri di ogni circonferenza su di un'unica retta avremmo come risultato un'ulteriore variazione compositiva del modello. In ultima istanza, i centri potrebbero essere non allineati e le circonferenze non rispettare tangenze ad una curva comune. È questo il caso di un disallineamento dei centri in cui la curva che unisce tutti i centri è una curva spezzata. Le tavole compositive presentate mettono in evidenza l'estetica del prospetto del muro a seconda dell'utilizzo delle quattro varianti fissando gli altri due parametri compositivi che prevedono l'utilizzo di una scala dei moduli differente e un'altezza dei moduli costante.

TAVOLA COMPOSITIVA 5
scala variabile, centri allineati



◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; **V** variabile
posizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

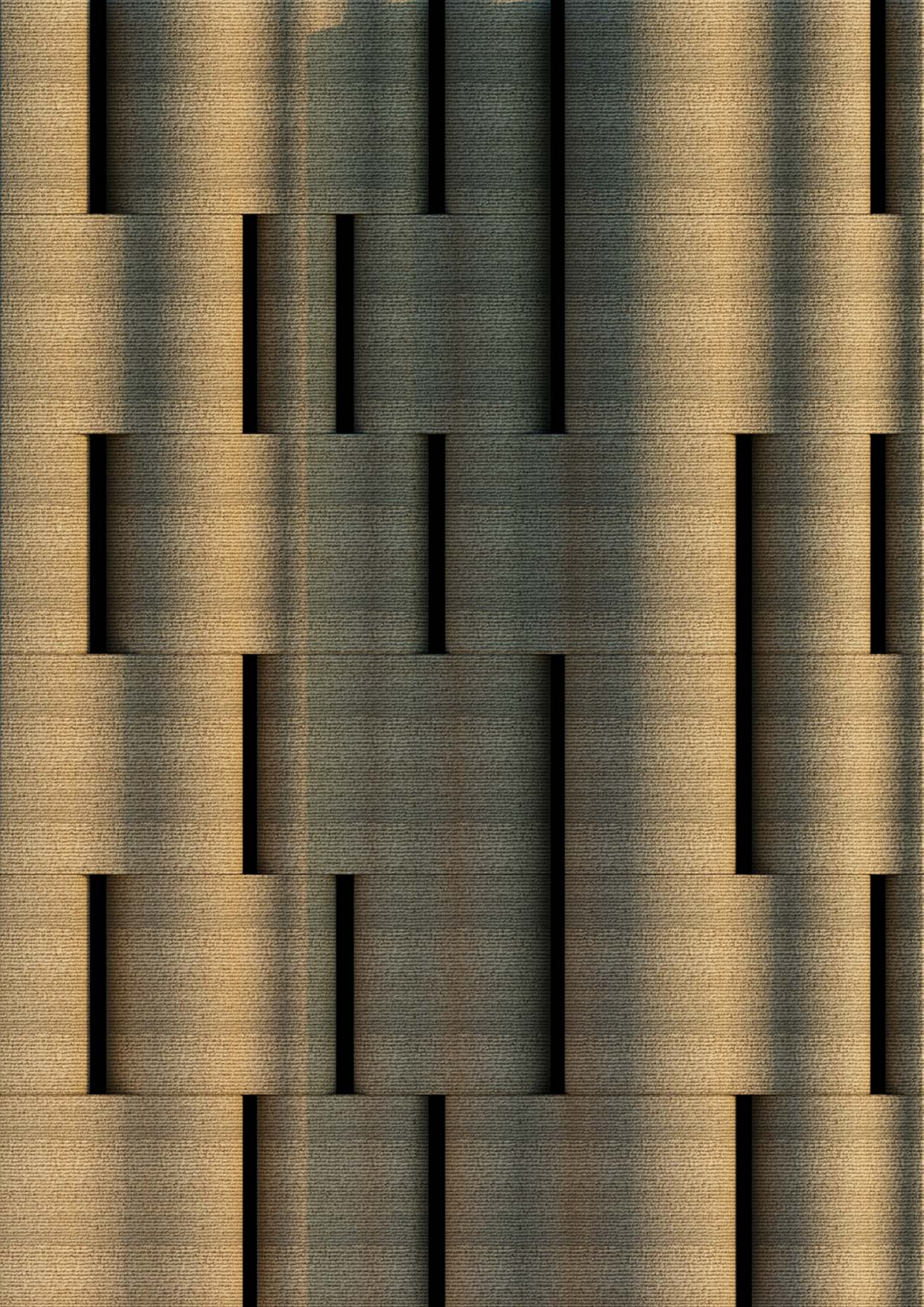
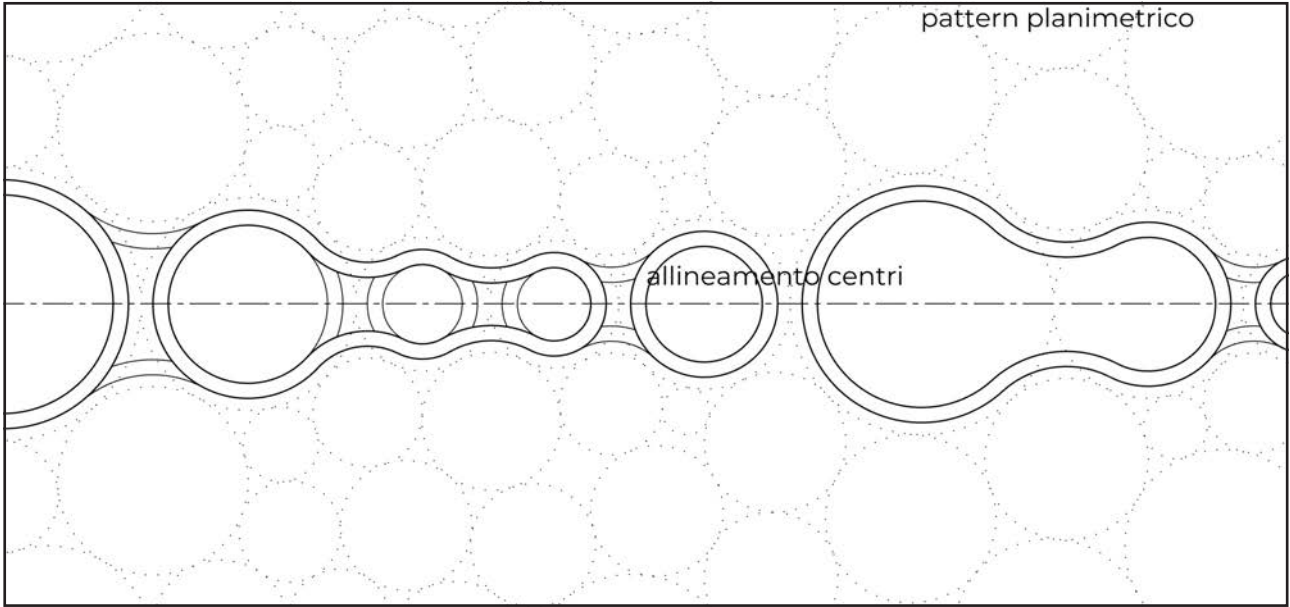
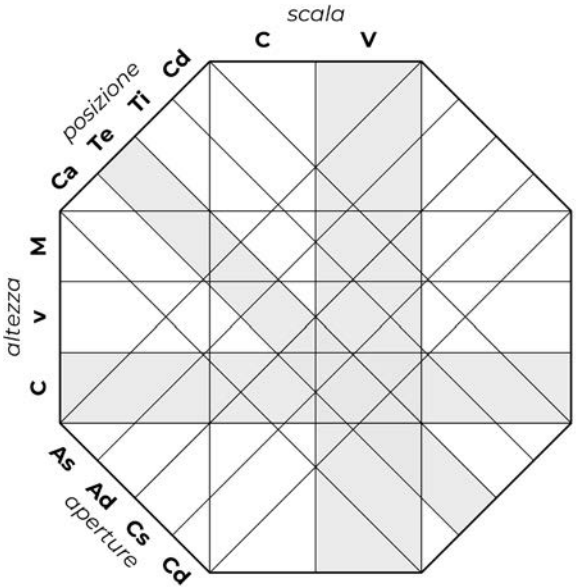


TAVOLA COMPOSITIVA 6

scala variabile, tangenti esternamente



◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:
C costante; **V** variabile
poizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimansione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

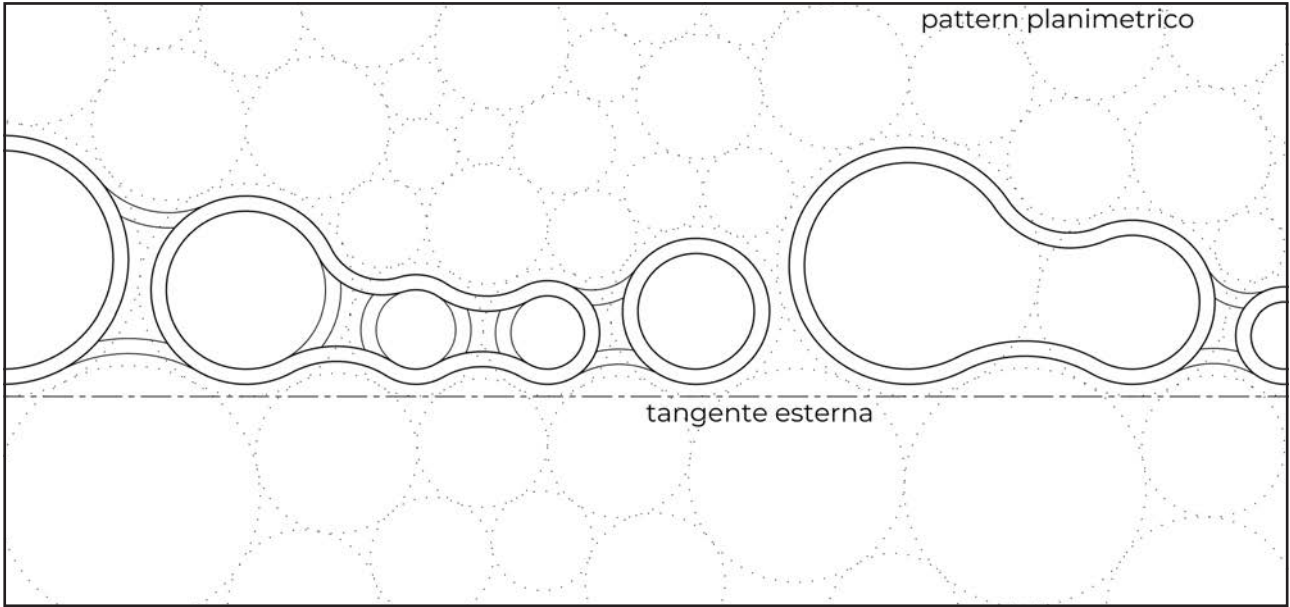
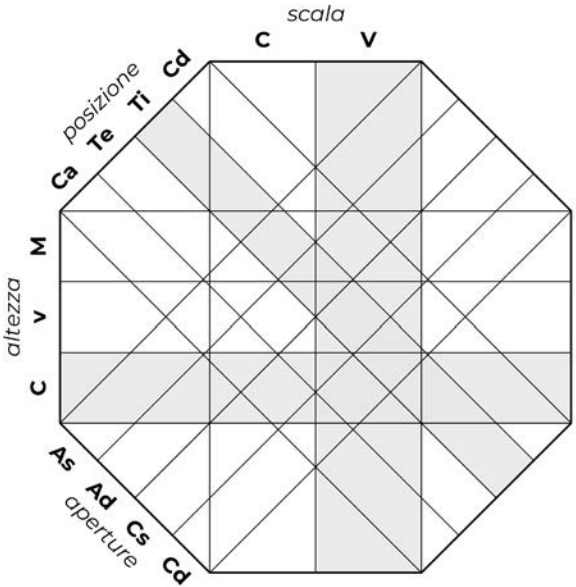


TAVOLA COMPOSITIVA 7
scala variabile, tangenti internamente



◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:

C costante; **V** variabile

posizione:

Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente

Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati

altezza:

C costante; **V** variabile; **M** mista

aperture:

As aperta singola; **Ad** aperta doppia

Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

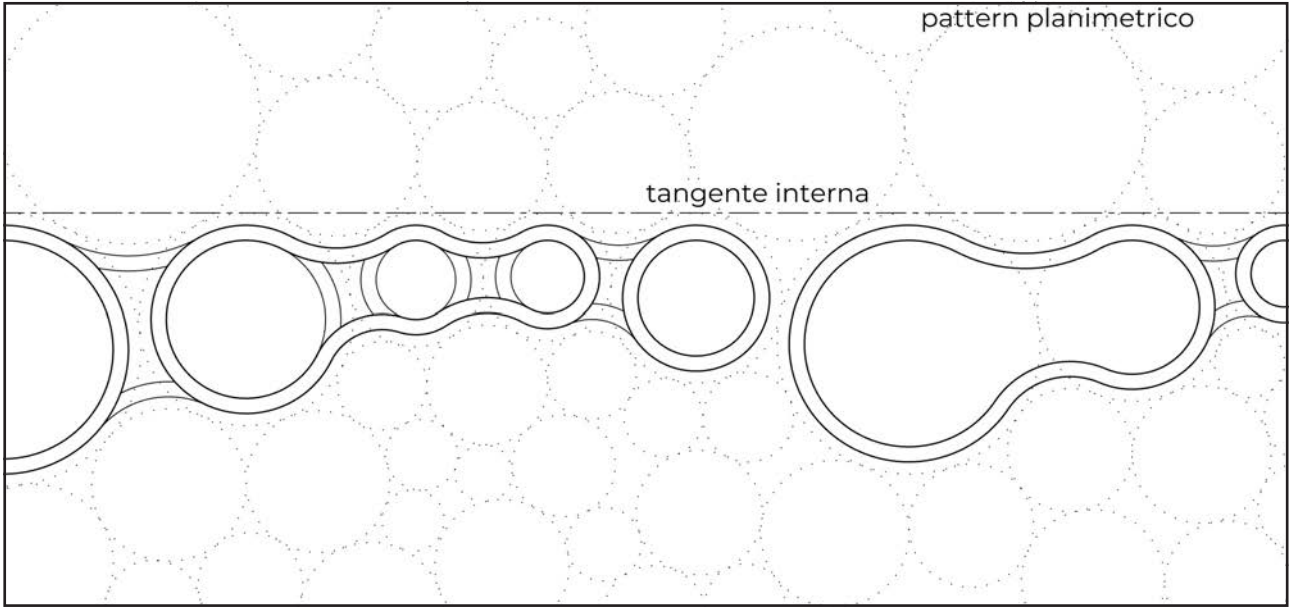
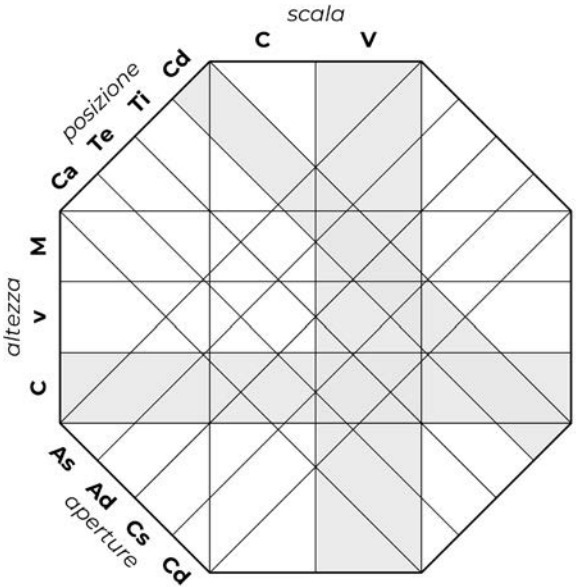


TAVOLA COMPOSITIVA 8
scala variabile, centri disallineati



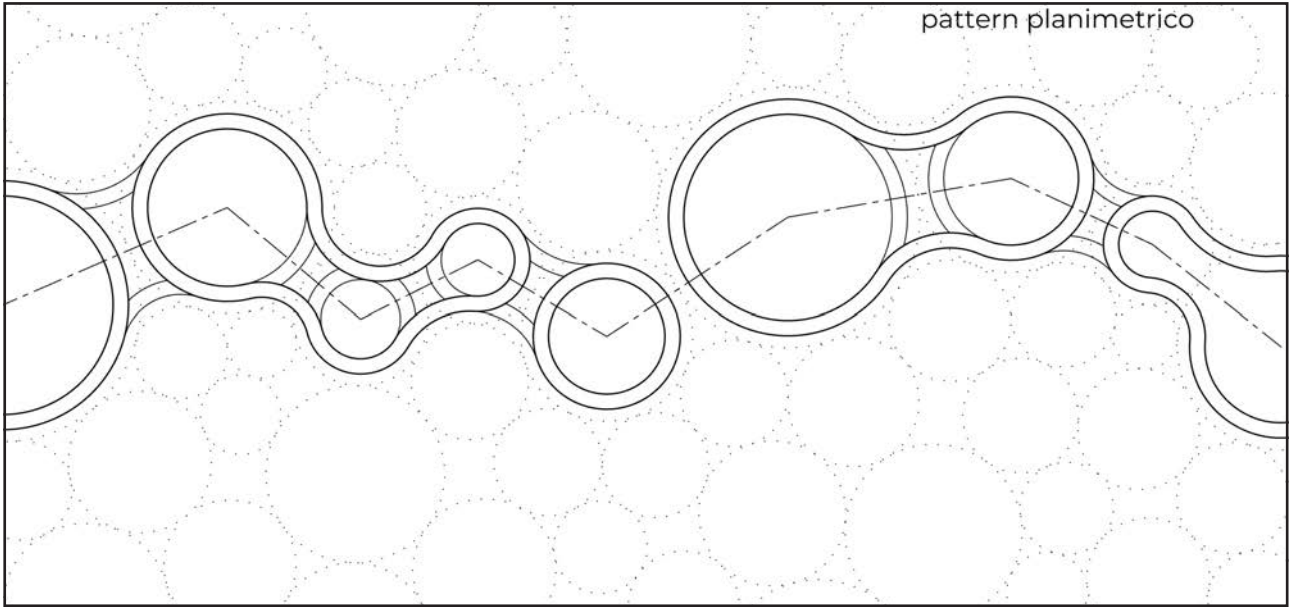
◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; V variabile
posizione:
Ca centri allineati; Te tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; Cd centri disallineati
altezza:
C costante; V variabile; M mista
aperture:
As aperta singola; Ad aperta doppia
Cs chiusa singola; Cd chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

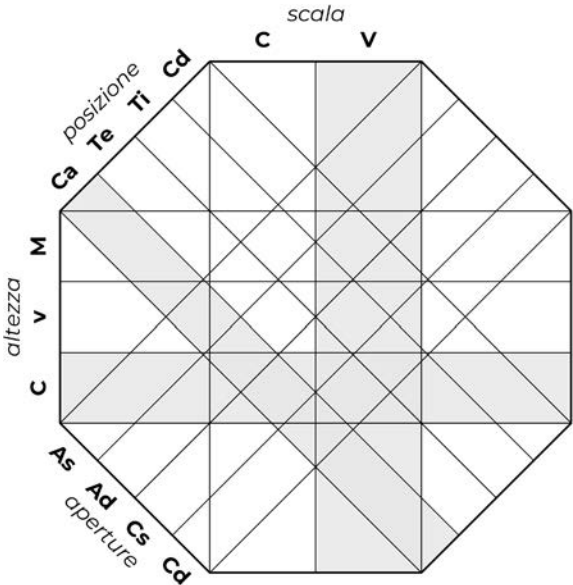


6.2.3 ALTEZZA

L'altezza del blocco conformato è un criterio compositivo visibile sul prospetto del muro. Utilizzando un'altezza costante, qui ipotizzata in 50 cm, il muro appare scandito da una precisa partitura orizzontale. Differentemente se si utilizza un'altezza variabile per l'intero elevato murario, la partitura orizzontale non ha più un ritmo costante ma si delinea in innumerevoli varianti. L'utilizzo di un'altezza del modulo mista in cui le circonferenze che compongono ogni blocco si sviluppano in cilindri con differenti altezze che poi vengono tra di loro aggregati a formare un unico blocco è una variante più complessa che comporta maggiore attenzione in fase di produzione. Infatti, data la codifica della stampa attraverso il processo di creazione di un unico contorno spiraliforme, nei punti in cui avviene la riduzione della sezione del layer del blocco è presumibile che avvenga una retrazione che potrebbe compromettere la risoluzione superficiale del blocco stesso. Inoltre, la riduzione della sezione impone che avvenga un percorso nel layer definito bridge in cui per qualche centimetro il materiale non avrà alcun supporto sottostante nella stampa ma sarà sorretto dalle due spalle su cui appunto si poggia il layer "ponte" così come la funzione lascia intendere. Anche in questo caso nelle tavole compositive presentate sono fissati gli altri due criteri compositivi per rendere evidente la variazione. In particolare, la scala dei moduli presenta blocchi composti da circonferenze tutte differenti e allineate secondo i rispettivi centri.

TAVOLA COMPOSITIVA 9

scala variabile, centri allineati, altezza costante



◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

- Legenda**

scala:

C costante; **V** variabile

poizione:

Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente

Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati

altezza:

C costante; **V** variabile; **M** mista

aperture:

As aperta singola; **Ad** aperta doppia

Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimansione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

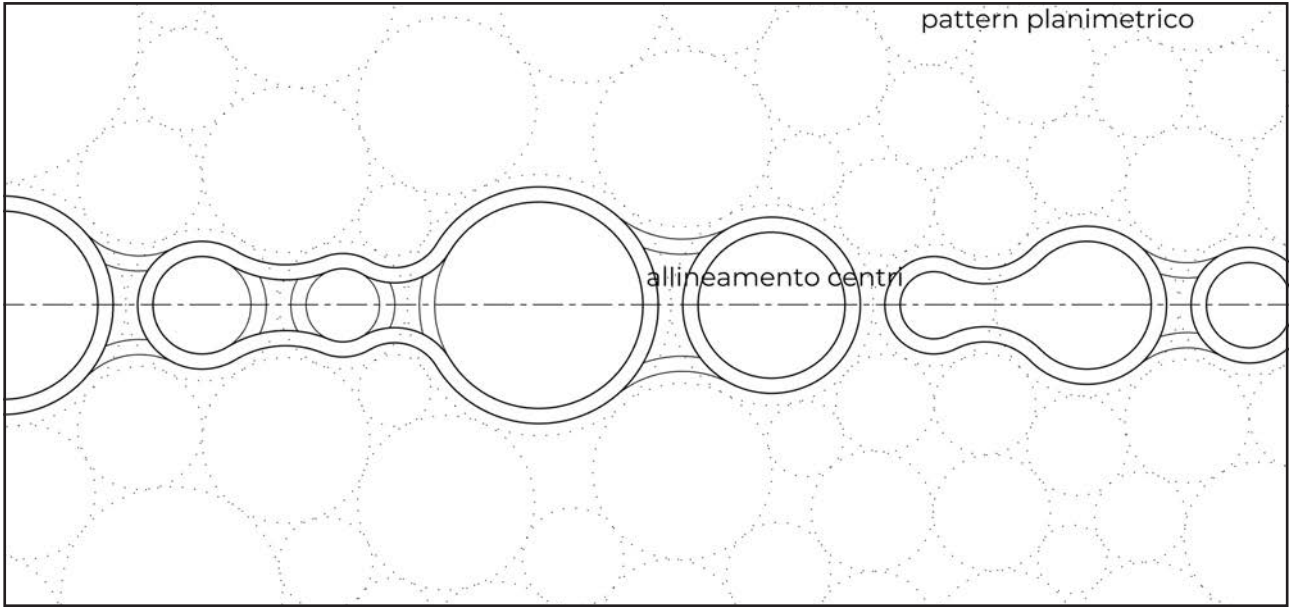
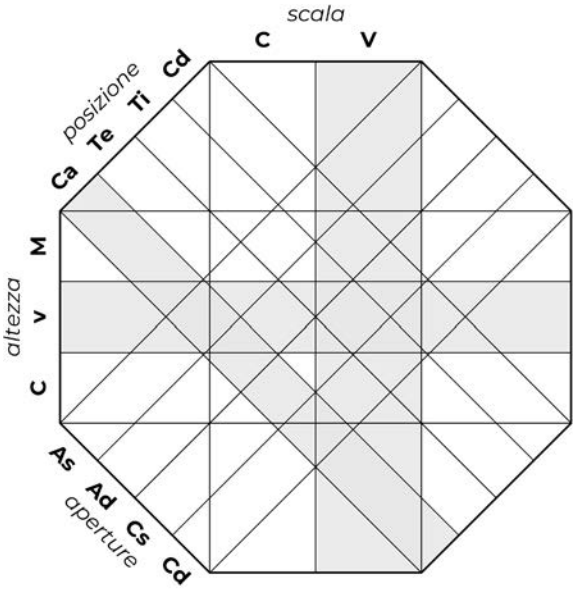


TAVOLA COMPOSITIVA 10

scala variabile, centri allineati, altezza variabile



◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; V variabile
posizione:
Ca centri allineati; Te tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; Cd centri disallineati
altezza:
C costante; V variabile; M mista
aperture:
As aperta singola; Ad aperta doppia
Cs chiusa singola; Cd chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

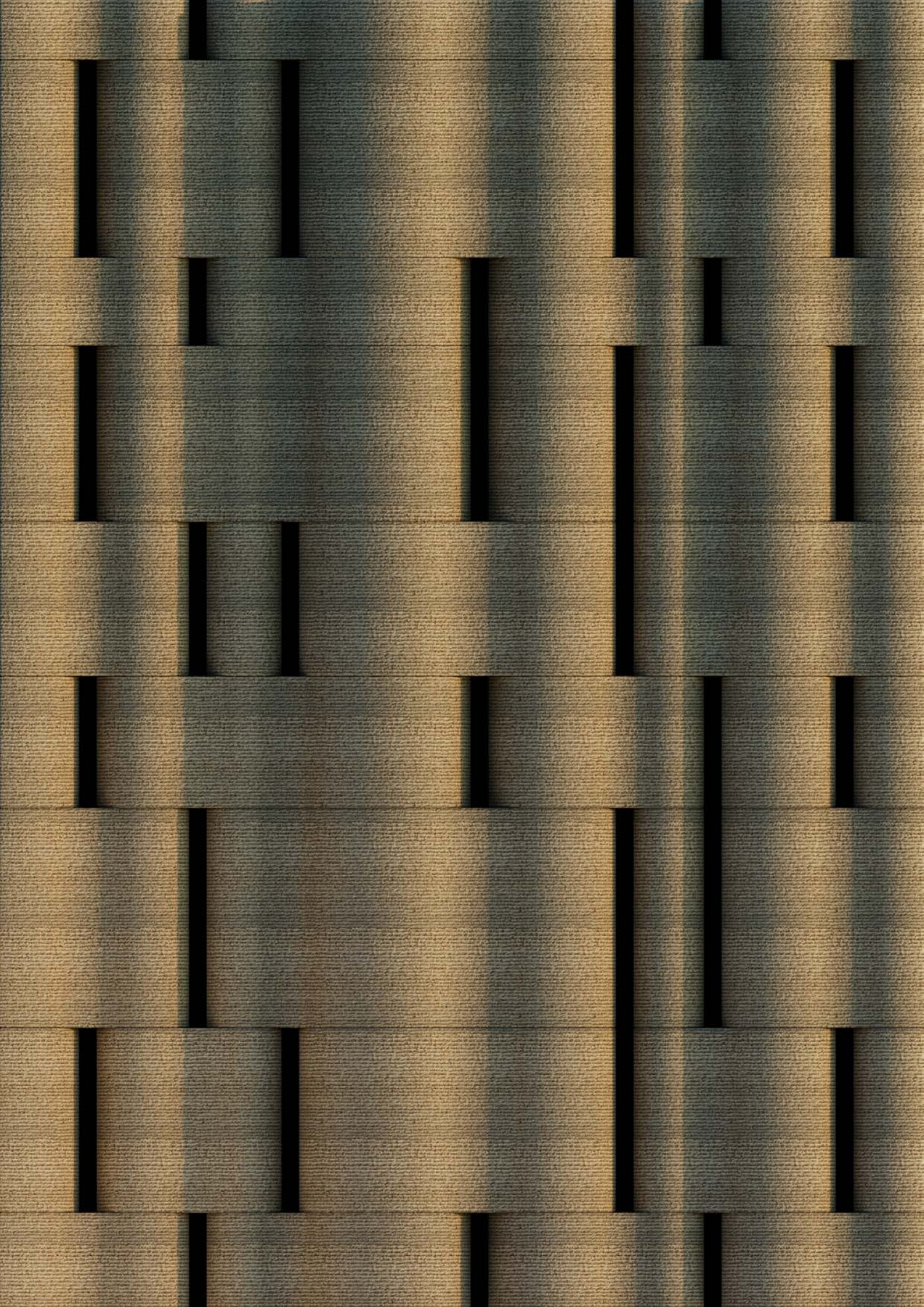
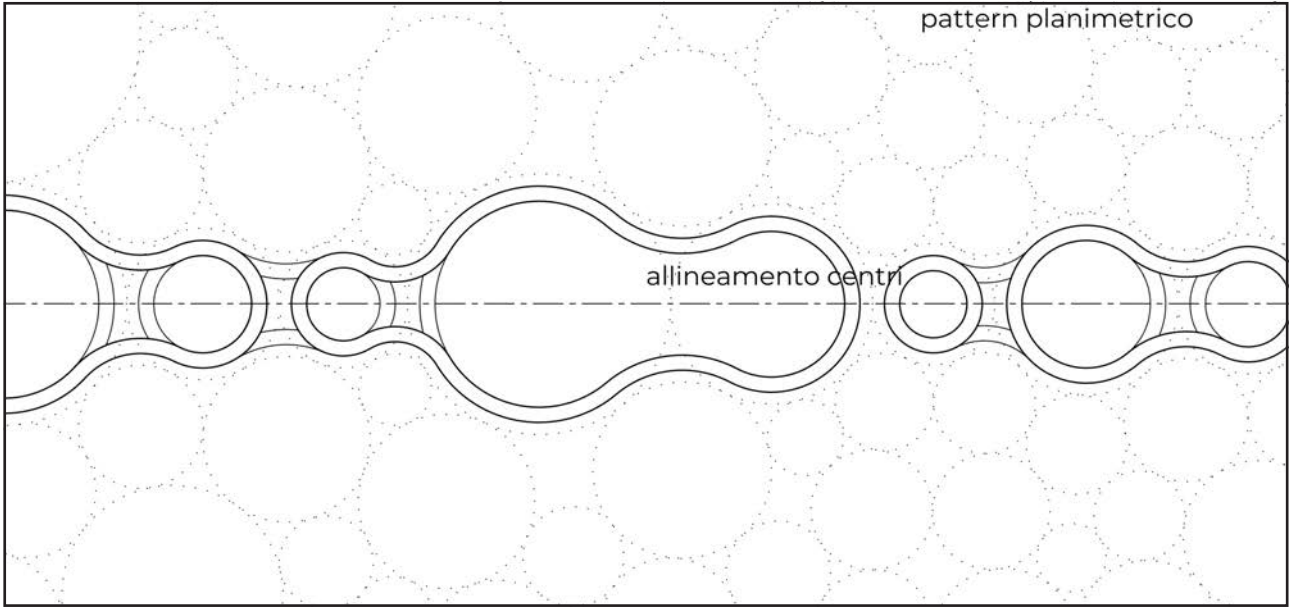
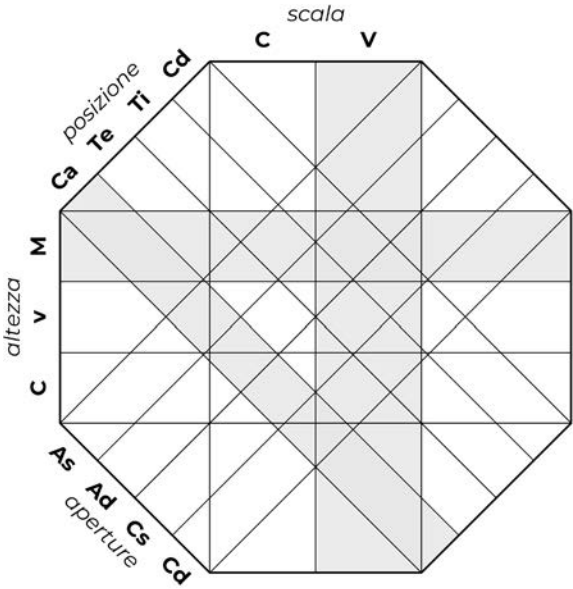


TAVOLA COMPOSITIVA 11

scala variabile, centri allineati, altezza mista



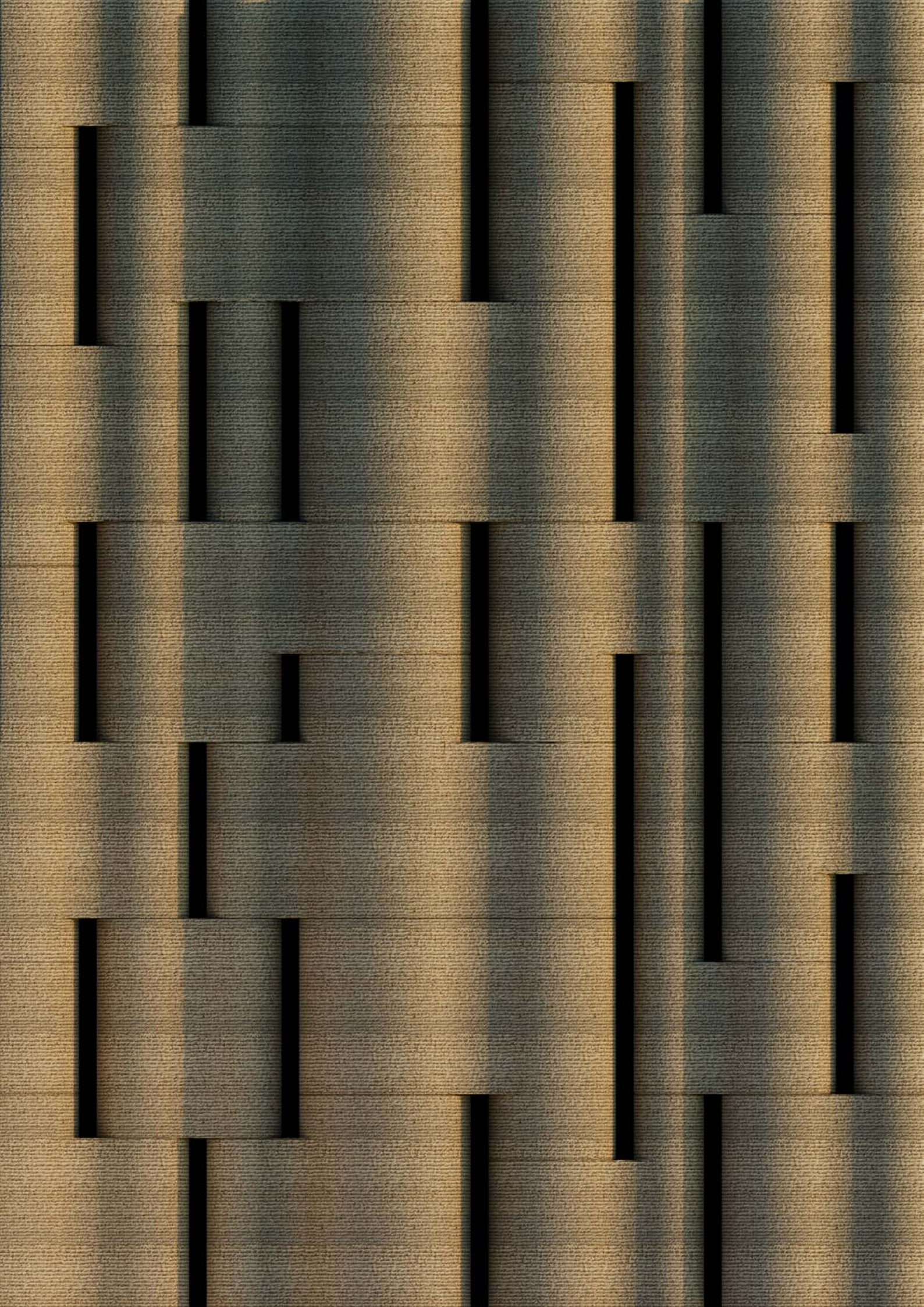
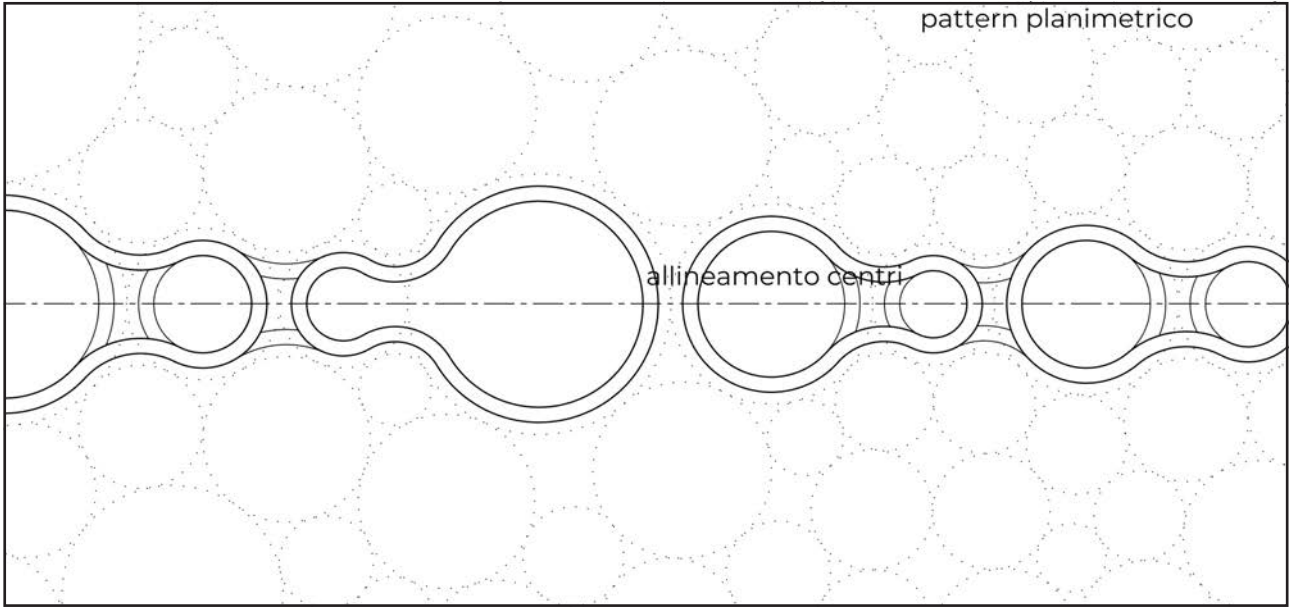
◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

- scala:
C costante; **V** variabile
- poizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
- altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
- aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

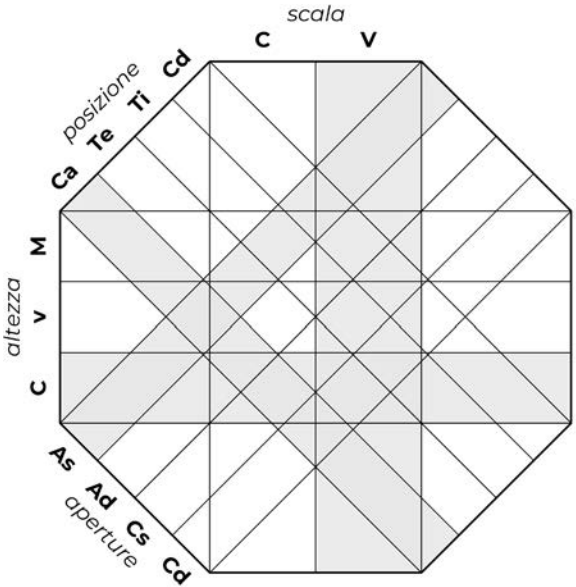


6.2.4 APERTURA DELLA MAGLIA MURARIA

Le ultime quattro tavole compositive mostrano le configurazioni del muro che presentano delle aperture all'interno della maglia muraria. Tali aperture possono fungere da varco di accesso o da varco visivo. Interessante risulta essere l'aspetto per cui questo criterio offra filari cilindrici che comportano variazioni. Essi, infatti, non sono più il risultato di una estrusione lineare ma sono frutto di operazioni più complesse, capaci di creare profili rastremati. La variazione delle sezioni dei cilindri in questione avviene all'interno dei blocchi creando angoli di sbalzo per la fase produttiva in Additive Manufacturing. Tale aspetto, però, avviene in maniera graduale rispettando gli angoli massimi consentiti dal processo produttivo. Questo principio rafforza ulteriormente la relazione tra forma consentita e tecnologia produttiva.

TAVOLA COMPOSITIVA 12

apertura della maglia muraria: aperta singola



◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:

C costante; **V** variabile

posizione:

Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente

Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati

altezza:

C costante; **V** variabile; **M** mista

aperture:

As aperta singola; **Ad** aperta doppia

Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

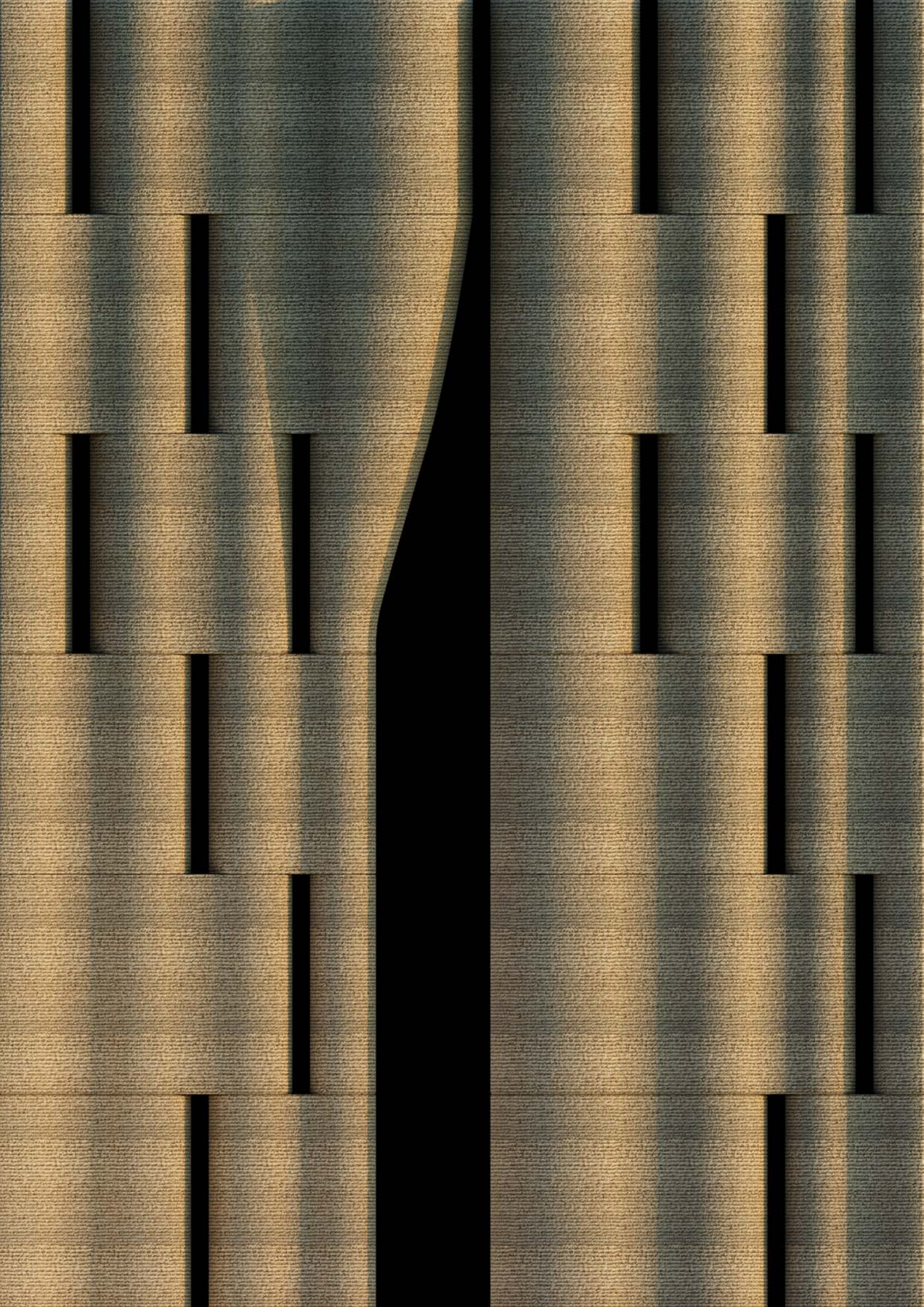
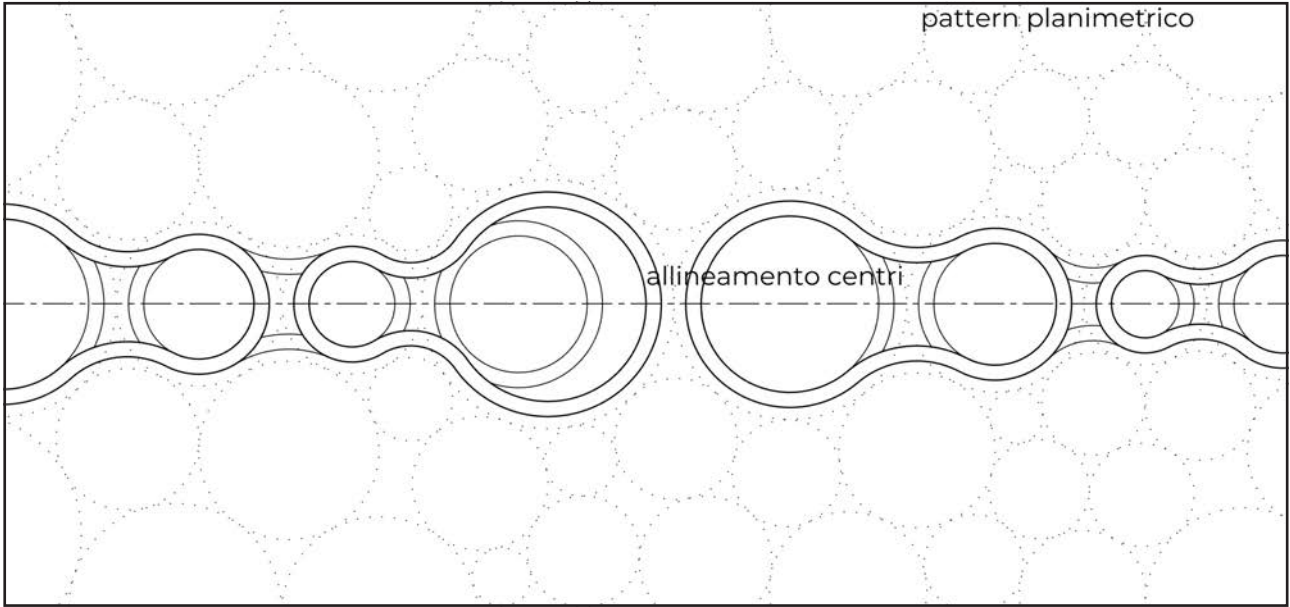
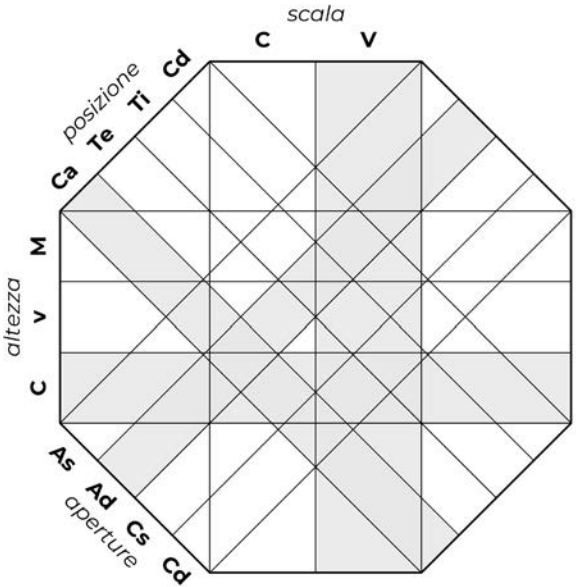


TAVOLA COMPOSITIVA 13

apertura della maglia muraria: aperta doppia



◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:

C costante; **V** variabile

posizione:

Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente

Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati

altezza:

C costante; **V** variabile; **M** mista

aperture:

As aperta singola; **Ad** aperta doppia

Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼ Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

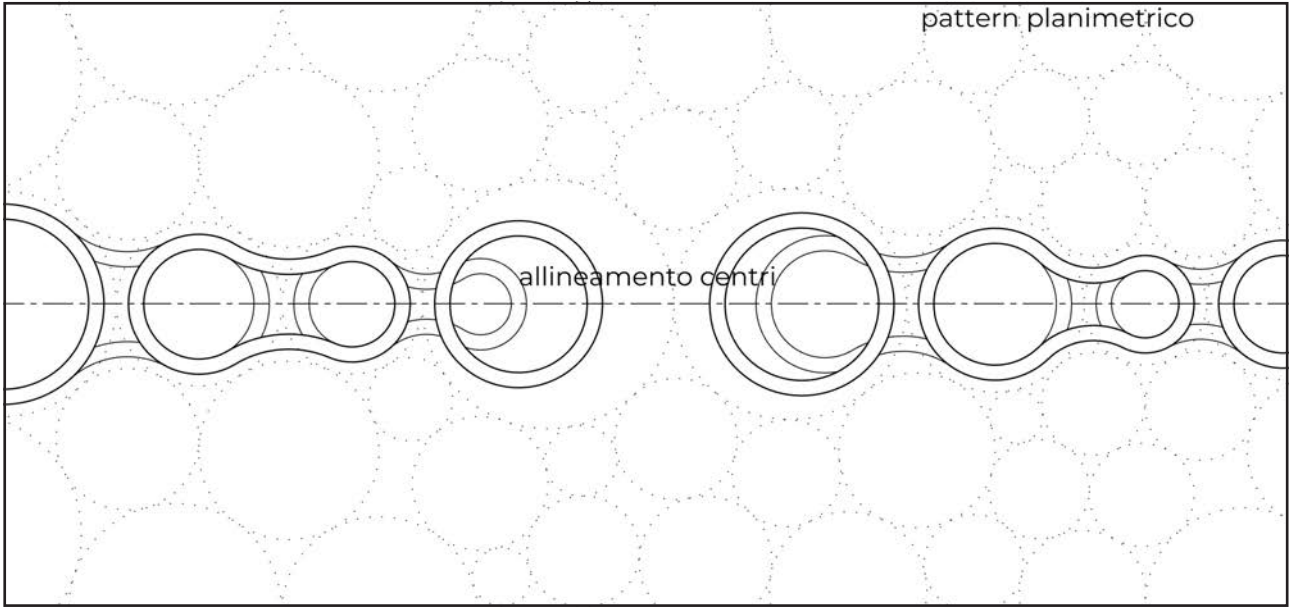
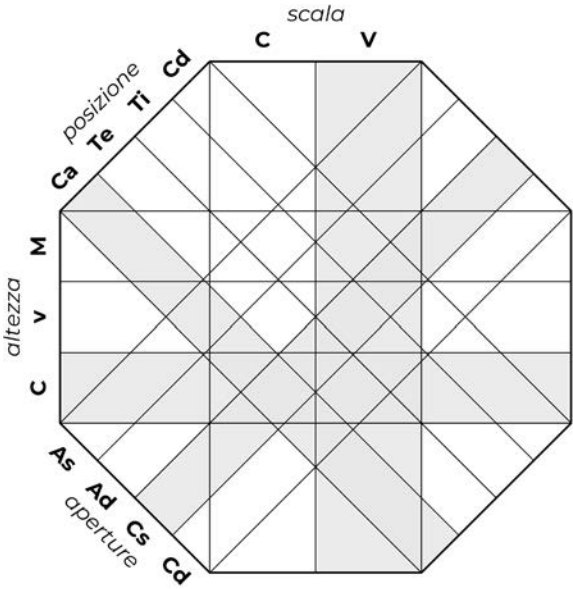


TAVOLA COMPOSITIVA 14

apertura della maglia muraria: chiusa singola



◀ Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:
C costante; **V** variabile
poizione:
Ca centri allineati; **Te** tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; **Cd** centri disallineati
altezza:
C costante; **V** variabile; **M** mista
aperture:
As aperta singola; **Ad** aperta doppia
Cs chiusa singola; **Cd** chiusa doppia

▶ Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimansione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

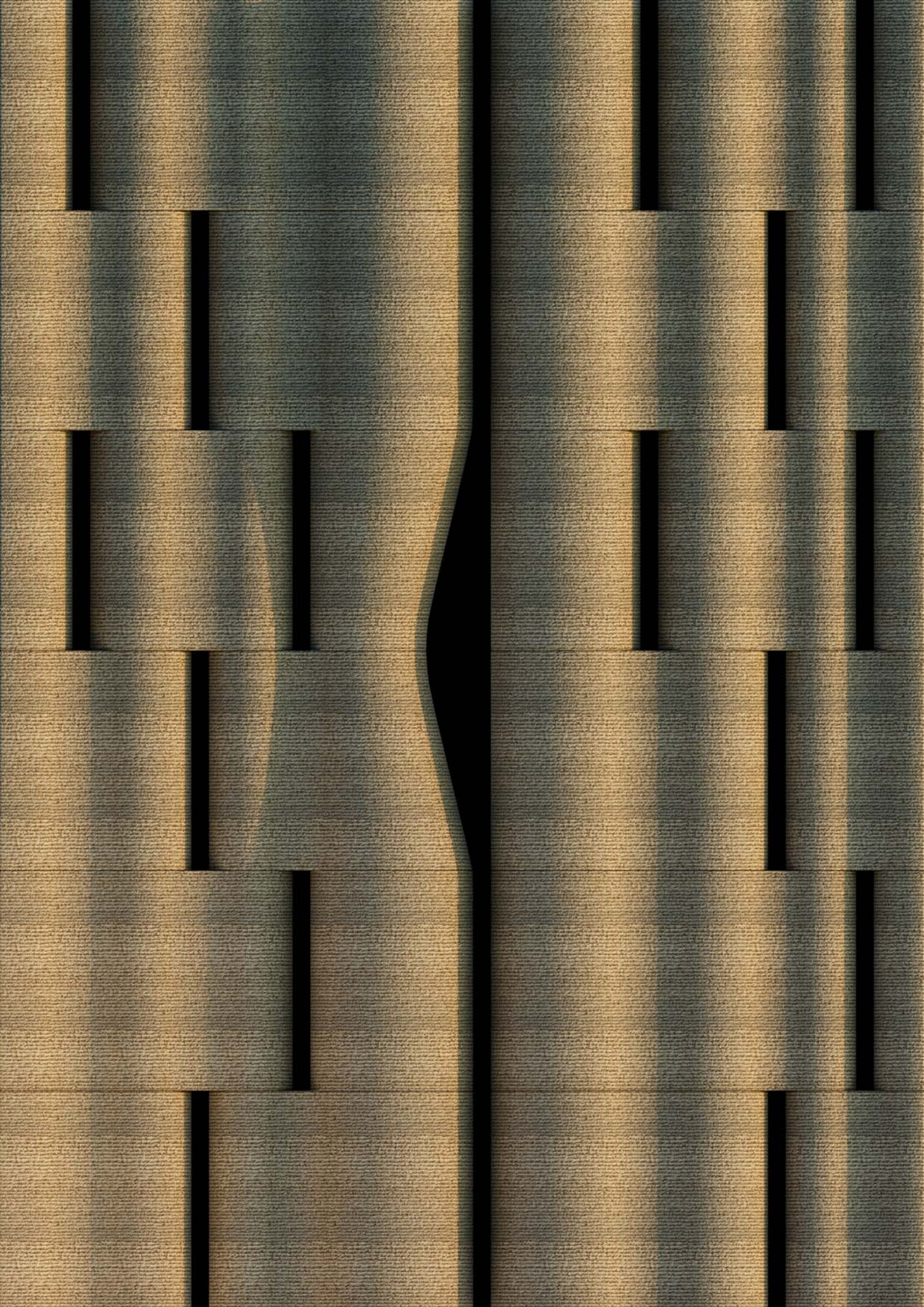
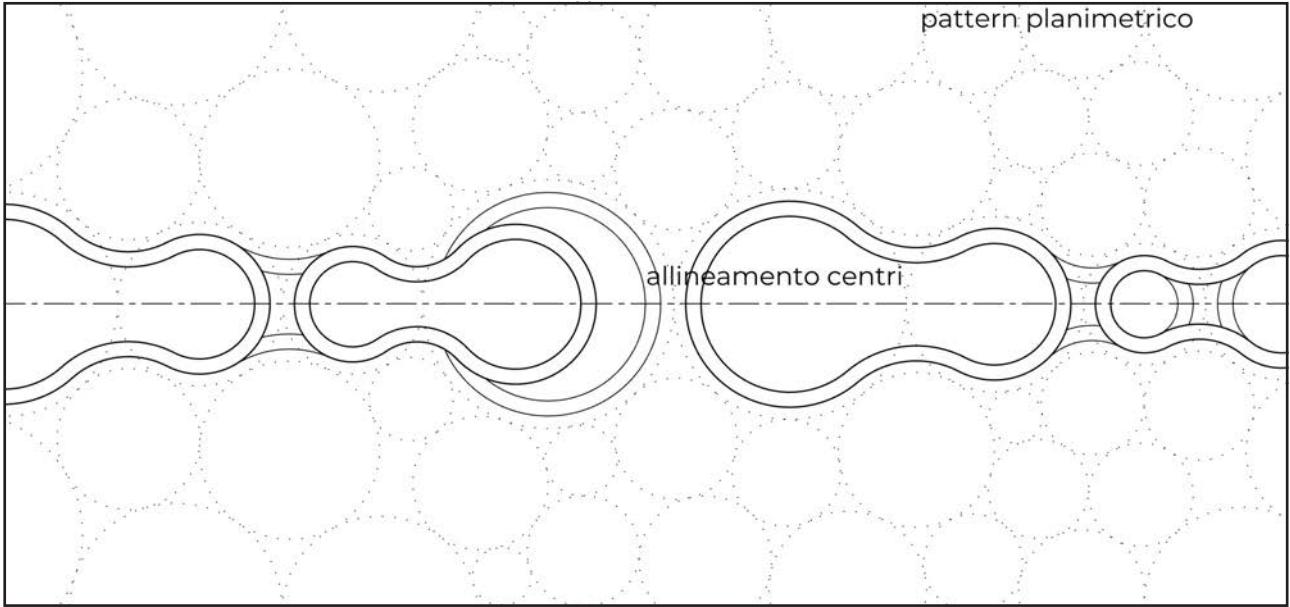
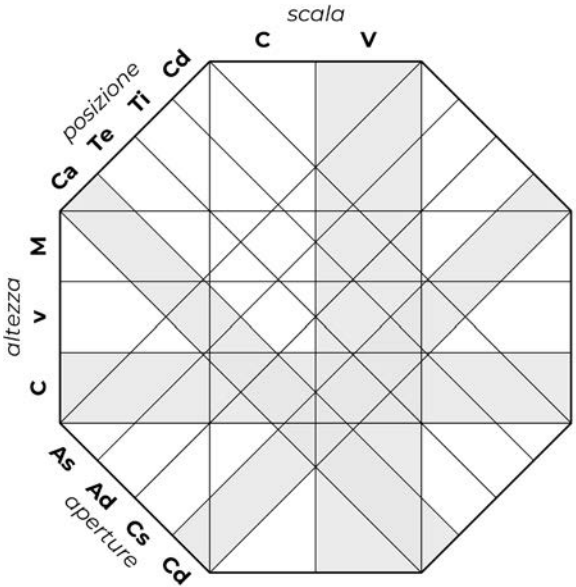


TAVOLA COMPOSITIVA 15

apertura della maglia muraria: chiusa doppia



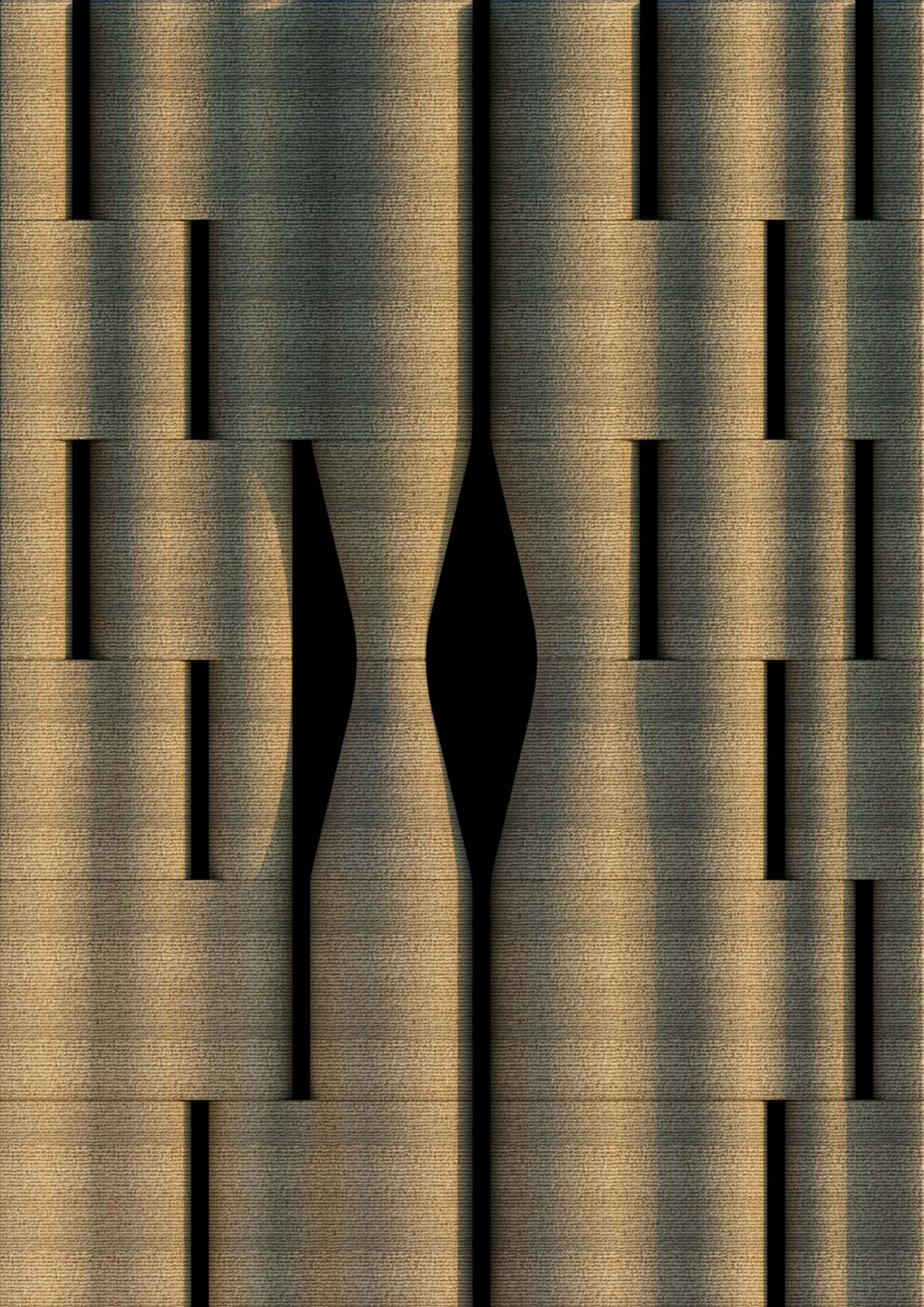
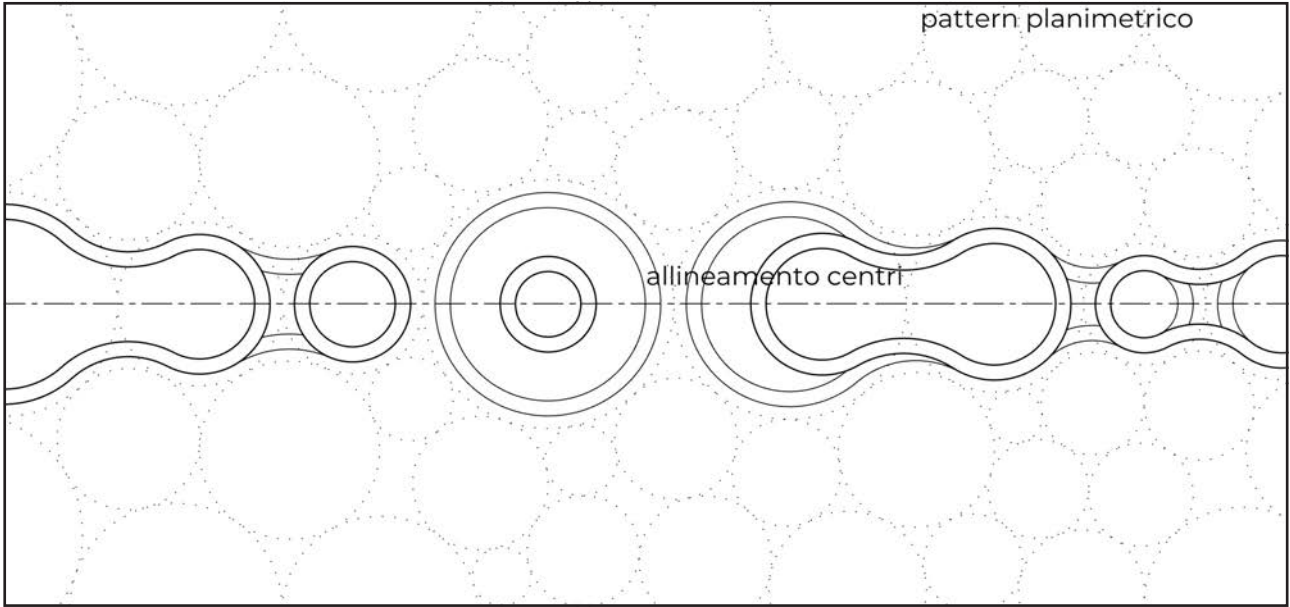
◀Matrice ottagonale dei criteri compositivi indicante la configurazione mostrata in pianta e prospetto.

Legenda

scala:
C costante; V variabile
posizione:
Ca centri allineati; Te tangenti esternamente
Ti tangenti internamente; Cd centri disallineati
altezza:
C costante; V variabile; M mista
aperture:
As aperta singola; Ad aperta doppia
Cs chiusa singola; Cd chiusa doppia

▶Alla pagina successiva: Visualizzazione del prospetto della configurazione muraria in materiale terra cruda realizzato mediante tecnologia additiva con altezza layer pari a 8,5 mm.

▼Planimetria della configurazione muraria in cui sono indicate le giaciture relative alla posizione reciproca dei moduli, la dimensione del pattern planimetrico dei moduli e la conformazione dei blocchi.

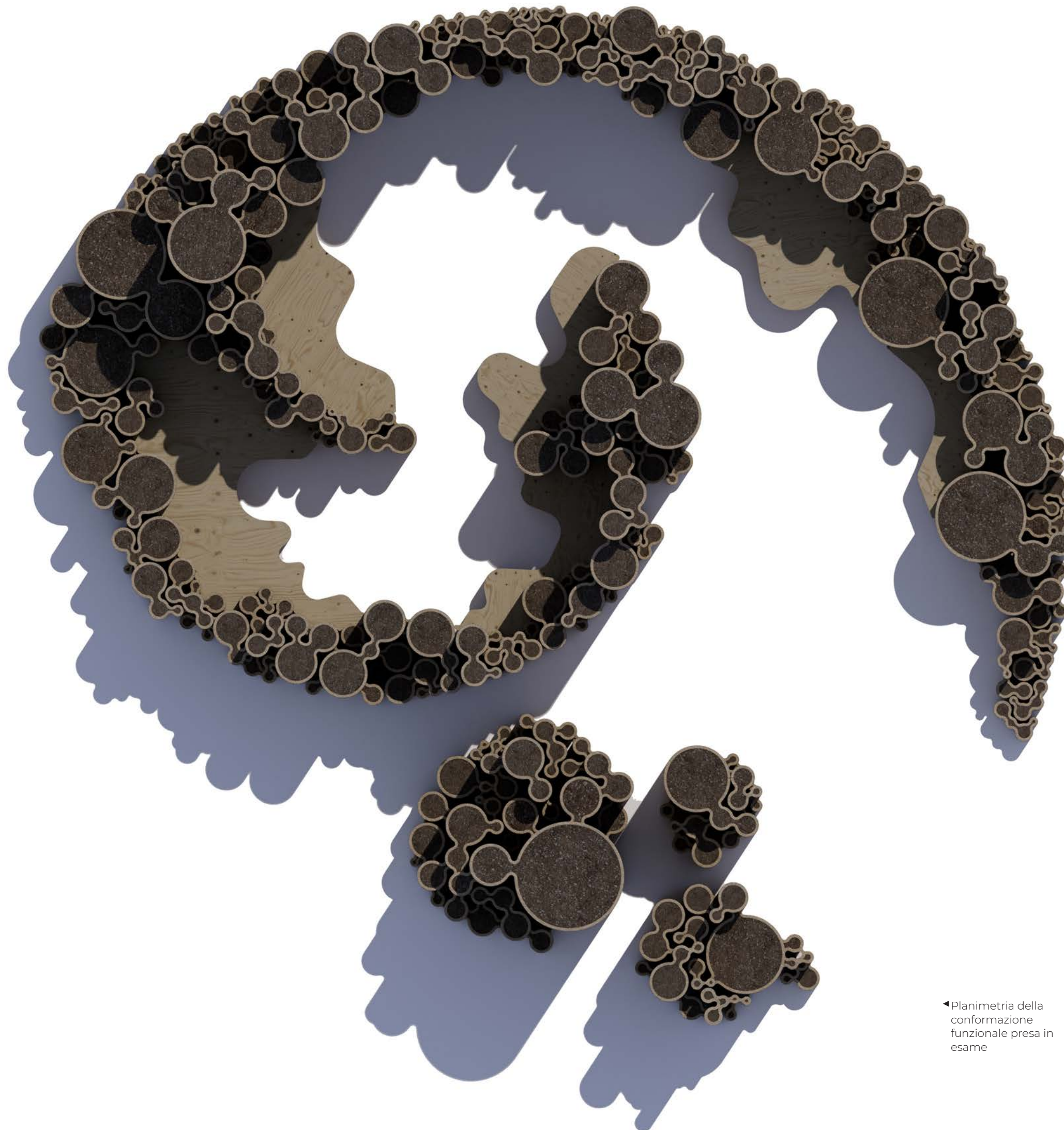


6.3 PERMUTAZIONI FUNZIONALI

Dopo aver esaminato in dettaglio i criteri compositivi del modello e aver dimostrato, attraverso una serie di tavole compositive, tutte le possibili variazioni che esso può offrire al progettista, si è passati alla presentazione di una configurazione applicata su una scala urbana. Le successive tavole compositive mostrano come sia stato possibile esplorare ampiamente le potenzialità del modello, evidenziando il modo in cui le sue componenti possano essere modificate per variare significativamente lo stile e l'estetica del muro in terra. Le variazioni stilistiche presentate permettono di comprendere le infinite possibilità di personalizzazione, offrendo al progettista una vasta gamma di opzioni per adattare il modello alle specifiche esigenze estetiche, funzionali e contestuali.

In questo contesto, viene ora illustrata una configurazione specifica del modello, applicata alla scala urbana, dimostrando la sua versatilità nell'adattarsi alle diverse necessità dello spazio urbano mediterraneo. Tale applicazione a livello urbano non si limita alla semplice riproduzione del modello, ma rivela come esso possa essere impiegato per rispondere efficacemente alle molteplici funzioni che caratterizzano lo spazio pubblico e privato in un contesto mediterraneo, dove clima, cultura e usi sociali richiedono soluzioni flessibili e adattabili.

Dalla pianta, dalle viste prospettiche e dalle sezioni che la accompagnano, emerge chiaramente come il modello riesca, non solo a delimitare e organizzare lo spazio, ma anche a conferire una funzione privata ad alcuni luoghi pubblici. Questo è possibile attraverso l'uso sapiente del muro in terra, che, grazie alla sua plasticità e alla sua capacità di integrarsi all'in-



◀ Planimetria della
conformazione
funzionale presa in
esame

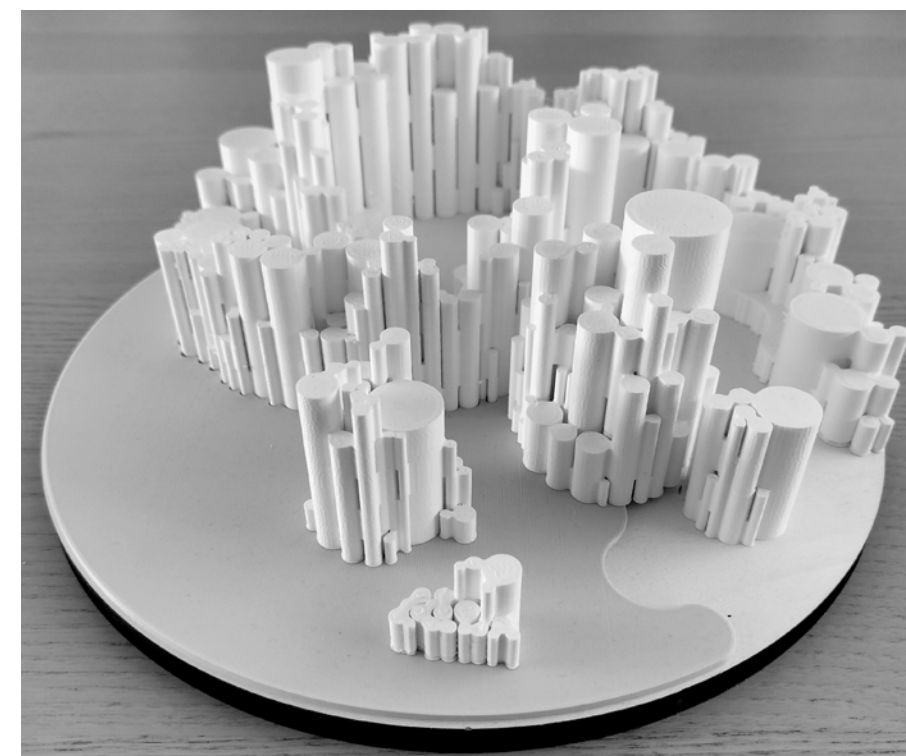
terno del paesaggio urbano, diventa uno strumento capace di definire confini e spazi.

In particolare, il modello si dimostra in grado di “recintare” lo spazio, creare delle aree ben definite all’interno del contesto urbano, favorendo l’instaurarsi di una relazione privata all’interno di uno spazio pubblico. In altre parole, il modello offre una soluzione innovativa per gestire la privacy e la socialità negli spazi urbani, polarizzando il tessuto urbano stesso attraverso una serie di installazioni puntuali. Queste installazioni, che possono assumere diverse forme e funzioni, agiscono come elementi caratterizzanti all’interno dell’ambiente circostante, conferendo una forte identità visiva e funzionale ai luoghi in cui vengono inserite.

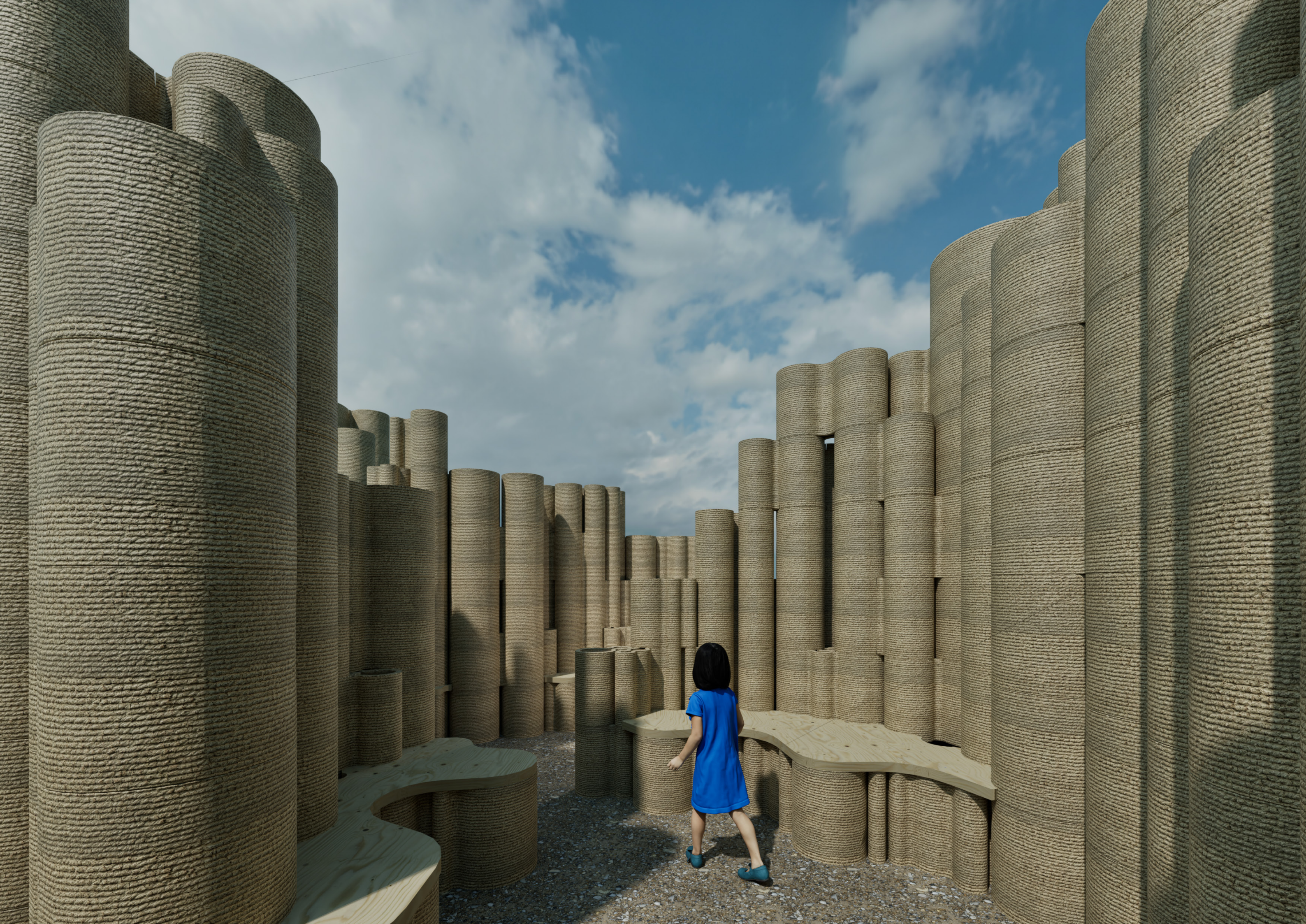
Le installazioni puntuali, oltre a polarizzare lo spazio, hanno il potenziale di diventare punti di riferimento all’interno della città, contribuendo a creare un senso di appartenenza e identità per la comunità che abita questi spazi. Grazie alla loro versatilità, tali installazioni possono essere adattate a diversi usi, da quelli puramente decorativi a quelli funzionali, come sedute, ombreggiature, o aree di incontro e socializzazione. In questo modo, il modello non solo risponde alle esigenze di caratterizzazione estetica, ma diventa un vero e proprio strumento progettuale per la gestione e l’organizzazione dello spazio urbano. L’applicazione del modello alla scala urbana dimostra come esso possa interpretare in maniera dinamica e creativa le funzioni dello spazio mediterraneo, che è spesso caratterizzato da una forte compenetrazione tra spazi pubblici e privati, tra aree aperte e chiuse.



◀ Fotografia del plastico della conformazione funzionale presa in esame



◀ Fotografia del plastico della conformazione funzionale presa in esame





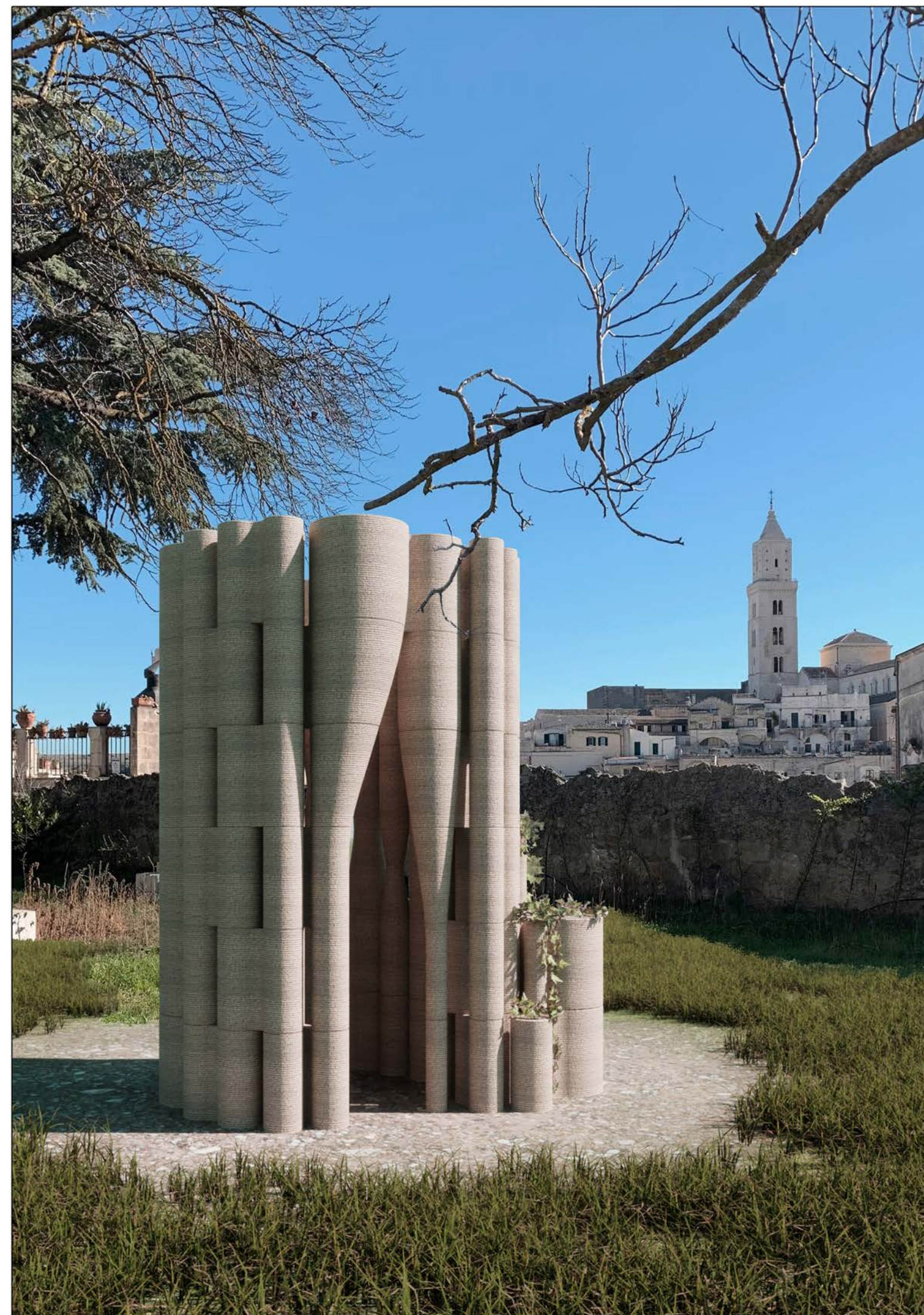
7 IL DIMOSTRATORE ARCHITETTONICO

7.1 INTRODUZIONE

Il dimostratore architettonico rappresenta una configurazione del modello precedentemente presentato. Esso consiste nella realizzazione di un muro abitabile dalla forma cilindrica. Questo elemento architettonico, il cui diametro misura 2 metri, l'altezza raggiunge i 3 metri e lo spessore del muro 50 centimetri, si configura come una struttura sperimentale con una forte valenza tecnico-scientifica. Il progetto è stato finanziato nell'ambito del progetto PON MAD (Metamorfosi Additiva del Design), promosso dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (ISNF). La scelta della conformazione cilindrica, con le dimensioni specifiche sopra descritte, non è casuale: essa è frutto della volontà di testare gli aspetti tecnici, fisici e compositivi del modello. L'obiettivo principale del dimostratore è quello di testare la capacità di mitigare le condizioni termo-igrometriche nell'ambiente esterno.

Il sito di realizzazione del dimostratore è il Giardino delle Tecnologie presso la Casa delle Tecnologie Emergenti di Matera all'interno l'Hub di San Rocco, ex convento riqualificato che si affaccia sul sasso Barisano della città. In particolare, dal giardino delle tecnologie vi è un affaccio diretto sul sasso con vista in direzione della cattedrale di Matera "Maria Santissima della Bruna". Questa collocazione non è solo funzionale, ma anche simbolica, poiché rappresenta un esempio tangibile di innovazione tecnologica all'interno di un contesto che promuove lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche. All'interno di questo laboratorio, è presente la stampante Delta Wasp 3MT Concrete, con la quale la realizzazione del dimostratore è in corso.

Il sito di progetto, situato nel cuore del giardino dell'Hub, gioca un ruolo fondamentale nel processo progettuale. Esso offre una duplice valenza: da un lato, la sua posizione caratterizzerà alcuni aspetti formali dipendenti da parametri ambientali propri del luogo, e, dall'altro, la sua vicinanza al laboratorio di produzione.



Il processo di definizione formale del dimostratore si basa sull'uso di un algoritmo progettuale che sfrutta i dati specifici del sito per determinare parametri fondamentali come l'irraggiamento solare incidente sulle superfici del modello. L'algoritmo, integrato nel processo di progettazione, consente di ottimizzare le prestazioni termiche del muro abitabile, tenendo conto delle condizioni climatiche locali. Questo approccio tecnologico non solo migliora l'efficienza energetica della struttura, ma permette anche di adattare la forma del muro alle specifiche esigenze del sito, creando un'architettura capace di dialogare con l'ambiente circostante in maniera dinamica e sostenibile.

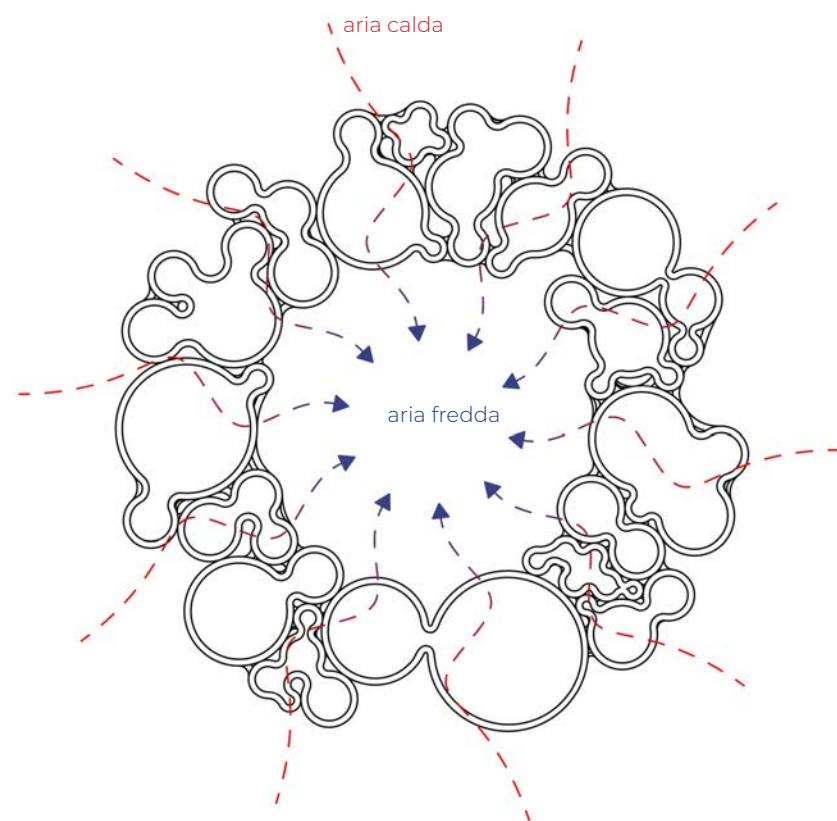
Inoltre, un aspetto chiave del progetto riguarda l'utilizzo di materiali naturali, reperibili direttamente sul luogo di costruzione. Questa scelta non solo riduce l'impatto ambientale dell'opera, ma rappresenta anche un importante passo verso una maggiore sostenibilità nei processi costruttivi. L'ipotesi di utilizzare materiale naturale locale, combinato con le tecniche innovative di stampa 3D, conferisce al progetto un valore aggiunto in termini di ecocompatibilità, riducendo la necessità di trasportare materiali da grandi distanze e sfruttando risorse già presenti in loco. La combinazione di tecnologia avanzata, sostenibilità e adattamento contestuale rende questo dimostratore un esempio di come l'architettura contemporanea possa evolvere verso nuove forme espressive e funzionali. Il progetto non si limita infatti a sperimentare nuove tecniche costruttive, ma cerca anche di rispondere a questioni più ampie legate al cambiamento climatico, alla riduzione dei consumi energetici e alla valorizzazione delle risorse locali.

7.2 LA FUNZIONE DEL DIMOSTRATORE

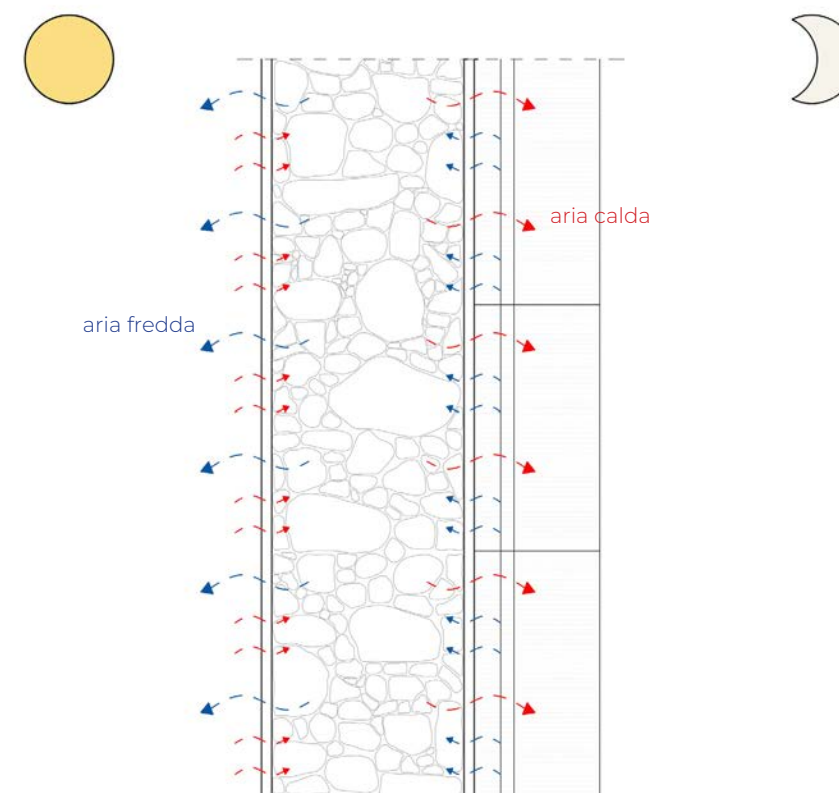
Il funzionamento alla base del dimostratore si fonda su una serie di principi di raffrescamento passivo che permettono di ottimizzare il comfort termico nei pressi del muro rubano senza l'ausilio di sistemi meccanici complessi o energivori. Questi principi sfruttano caratteristiche fisiche e naturali legate alla forma e ai materiali del dimostratore, rendendolo un esempio di architettura sostenibile e performante. I principali meccanismi di raffrescamento passivo integrati nel modello sono: il raffrescamento evaporativo, inerzia termica e condensazione e raccolta di umidità. La combinazione di questi tre principi rende il dimostratore un esempio altamente innovativo di architettura bioclimatica. Ogni elemento della struttura è studiato per lavorare in sinergia con le condizioni climatiche e ambientali del sito, riducendo la dipendenza da fonti energetiche esterne e offrendo una soluzione naturale e sostenibile per il controllo del microclima interno.

RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO

Principio che si basa sull'interazione tra i flussi d'aria esterni e la disposizione strutturale dei blocchi che compongono il dimostratore. L'aria calda e secca, proveniente dall'esterno, attraversa gli interstizi naturali creati tra un blocco e l'altro della parete. Durante questo passaggio, l'aria calda cede parte del suo calore alle molecole d'acqua presenti nei materiali o nelle superfici esposte, innescando il processo di evaporazione. Questo processo sottrae calore all'aria, che, una volta all'interno dell'ambiente, risulta più fresca e umida rispetto a quella esterna. Questo fenomeno non solo riduce la temperatura dell'aria che entra, ma contribuisce anche a creare un microclima più confortevole, soprattutto in climi secchi e aridi dove l'umidità è generalmente bassa.

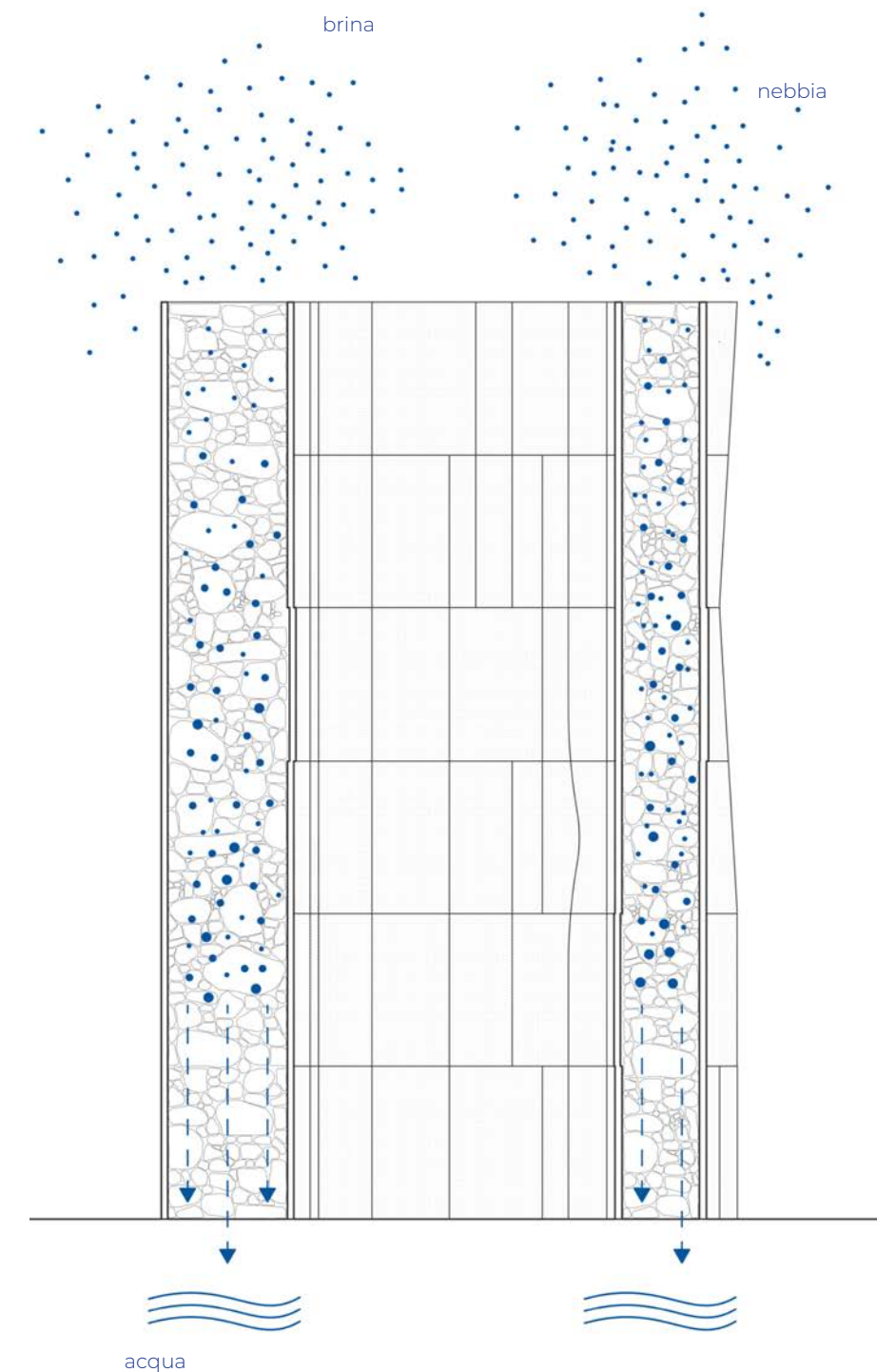


Capacità del materiale utilizzato, ossia la terra cruda, di fungere da massa termica. La terra cruda è nota per la sua elevata capacità di assorbire e rilasciare calore in modo graduale. Durante le ore più calde del giorno, il materiale assorbe il calore dell'ambiente circostante, evitando così che questo si trasmetta rapidamente all'interno della struttura. Durante la notte, invece, quando le temperature esterne si abbassano, il calore immagazzinato durante il giorno viene gradualmente rilasciato, mantenendo una temperatura interna più stabile e confortevole. Questo effetto di "ammortizzazione" delle variazioni termiche garantisce un comfort termico costante, riducendo la necessità di sistemi di riscaldamento o raffreddamento artificiale, sia durante le calde giornate estive che nelle fresche notti invernali.



CONDENSAZIONE E RACCOLTA DI UMIDITÀ

La capacità dei materiali utilizzati di contribuire alla raccolta e al recupero dell'umidità presente nell'aria. I blocchi che compongono la struttura sono contenitori di materiale disciolto all'interno, tra cui pietrisco, che ha proprietà specifiche per favorire la condensazione dell'umidità. Durante la notte, quando le temperature si abbassano e l'umidità relativa aumenta, la brina, la nebbia e l'umidità atmosferica tendono a depositarsi sulle superfici delle rocce contenute nei blocchi. Queste superfici, che non sono completamente permeabili, favoriscono la formazione di piccole quantità di acqua attraverso il processo di condensazione. L'acqua raccolta può poi essere riutilizzata o rimanere intrappolata all'interno dei materiali, contribuendo così alla regolazione dell'umidità dell'aria interna. Questo principio è particolarmente efficace in ambienti dove l'umidità notturna è elevata, come nelle zone caratterizzate da forti escursioni termiche o presenza di nebbia.



7.3 LA GENERAZIONE DELLA FORMA

Il processo di definizione formale del dimostratore è stato dettagliato attraverso il diagramma di flusso riportato di seguito. Questo diagramma evidenzia le diverse fasi della progettazione parametrica e le scelte progettuali effettuate, ponendo particolare enfasi sull'integrazione tra analisi ambientale e modellazione volumetrica per ottimizzare il manufatto finale per la stampa 3D.

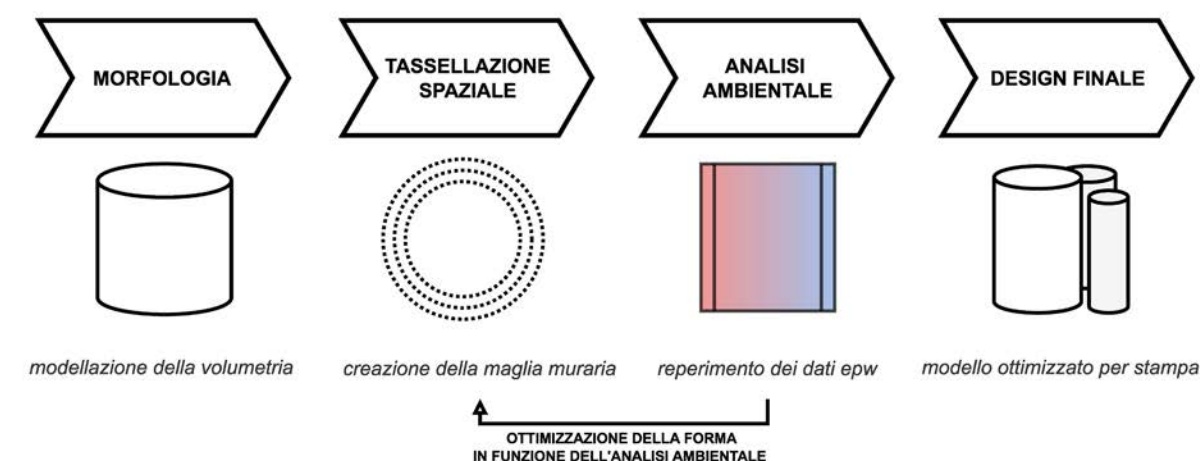
Il processo è strutturato in una sequenza di passaggi metodici, descritti come segue. In primo luogo, viene sviluppata la volumetria generale del dimostratore, stabilendo le linee guida spaziali che ne definiscono la morfologia. Successivamente, il volume viene discretizzato attraverso una tassellazione spaziale, suddividendolo in elementi più piccoli, gestibili in modo efficiente dal punto di vista della stampa 3D. La dimensione e la forma degli elementi discreti vengono poi ulteriormente ottimizzate sulla base di un'analisi ambientale approfondita, sfruttando i dati specifici del sito di progetto, quali l'incidenza solare, la ventilazione naturale, e ulteriori parametri climatici pertinenti, consentendo una progettazione che risponde puntualmente alle specificità del microclima locale.

Questa geometria parametrica è stata progettata per rispondere in modo dinamico alle condizioni ambientali. La variazione dei diametri dei blocchi è strettamente correlata all'incidenza dei raggi solari sulla superficie del dimostratore. I blocchi disposti sul lato nord presentano circonferenze con diametri maggiori, una scelta progettuale finalizzata all'incremento della massa termica, migliorando così l'inerzia termica e contribuendo alla stabilità delle temperature interne durante la stagione fredda. Al contrario, i blocchi orientati verso sud sono dimensionati con diametri minori, al fine di creare maggiori interstizi tra i vari elementi, favorendo una naturale ventilazione e mitigando il rischio di surriscaldamento estivo.

L'analisi ambientale e l'ottimizzazione della geometria sono

state rese possibili grazie all'impiego del plug-in Ladybug per Grasshopper, uno strumento di scripting visuale integrato nel software di modellazione Rhinoceros3D. Ladybug permette di eseguire simulazioni ambientali in modo integrato e parametrico, consentendo rapide iterazioni progettuali al fine di individuare la configurazione ottimale rispetto ai vincoli climatici e alle specificità del contesto.

Il dimostratore comprende un varco per l'ingresso, posizionato e orientato con precisione in relazione alla morfologia del sito. Questo varco è diretto verso l'ingresso del giardino, creando un legame visivo e funzionale con lo spazio verde circostante. La conformazione del varco è stata ottenuta attraverso la rastremazione asimmetrica di alcuni blocchi, generando un effetto di apertura graduale. Inoltre, è stato creato un traguardo visivo, orientato verso la cattedrale di Matera, ottenuto mediante una rastremazione concentrica dei blocchi, che incornicia e valorizza la vista sulla cattedrale.



7.4 LA STRUTTURA DEL DIMOSTRATORE

Strutturalmente il dimostratore architettonico si fonda su una metodologia costruttiva che prevede l'impiego di blocchi giustapposti e montati a secco, senza l'utilizzo di malta o leganti tradizionali. Questa tecnica consente di realizzare una struttura solida e resistente, sfruttando al massimo le caratteristiche meccaniche e fisiche dei materiali, pur mantenendo un approccio costruttivo semplice e facilmente reversibile. Il processo di stabilizzazione del muro è reso possibile attraverso il riempimento dei blocchi con un materiale disciolto che, oltre a fungere da legante verticale, permette di garantire l'integrità strutturale del muro stesso.

La realizzazione del dimostratore ha offerto l'opportunità di testare il sistema costruttivo a scala reale, permettendo così di verificare la validità delle ipotesi progettuali iniziali. È stato possibile osservare in dettaglio il comportamento della struttura durante le varie fasi di assemblaggio e ottenere conferme riguardo alla solidità e alla funzionalità del sistema. Tale verifica empirica si è rivelata fondamentale per confermare la fattibilità del progetto e la sua efficacia come modello costruttivo. Il montaggio del dimostratore segue un processo ordinato e ripetitivo, organizzato per livelli, ognuno dei quali viene completato prima di passare al successivo. Questo approccio modulare consente di costruire la struttura in maniera progressiva, garantendo stabilità e coerenza durante tutte le fasi del processo. Le fasi principali sono così articolate:

POSIZIONAMENTO DEL PRIMO LIVELLO

Il montaggio inizia con la disposizione dei blocchi del primo livello, i quali vengono accuratamente posizionati nella corretta configurazione spaziale per formare la base del muro. Questo posizionamento è cruciale, in quanto costituisce il fondamento su cui si erigeranno i livelli superiori. La precisione nella disposizione dei blocchi iniziali garantisce la stabilità complessiva della struttura.

RIEMPIMENTO PARZIALE DEI BLOCCHI

Una volta posizionati i blocchi del primo livello, questi vengono parzialmente riempiti con il materiale disciolto. Tale materiale ha la funzione di legante e di elemento di stabilizzazione verticale, che contribuisce a mantenere uniti i blocchi e a consolidare il primo livello del muro. Il riempimento parziale consente di lasciare lo spazio necessario per il collegamento con il livello successivo.

INSERIMENTO DELLE CANNE DI BAMBÙ

Prima di procedere alla costruzione del livello successivo, vengono inserite delle canne di bambù all'interno dei blocchi parzialmente riempiti. Queste canne hanno un ruolo fondamentale, poiché fungono da connettori tra i diversi livelli, garantendo un legame strutturale verticale continuo che conferisce ulteriore resistenza e stabilità all'intero muro. Il bambù è stato scelto per la sua flessibilità, resistenza e sostenibilità, rendendolo un materiale ideale per questo tipo di costruzione.

POSIZIONAMENTO DEL SECONDO LIVELLO

Dopo l'inserimento delle canne di bambù, si procede con la disposizione dei blocchi del secondo livello, che vengono posizionati sopra quelli del primo. Questo è un passaggio cruciale in quanto, come noto, i blocchi del secondo livello sono differenti da quelli del primo poiché formati dall'aggregazione non delle stesse circonferenze di base. Soluzione utile a creare il corretto ammorsamento tra i livelli del muro. Una volta completato questo passaggio, i blocchi del secondo livello vengono anch'essi riempiti con il materiale disciolto, che completa il volume sia del secondo livello che di parte del primo, creando un collegamento solido tra i due strati.

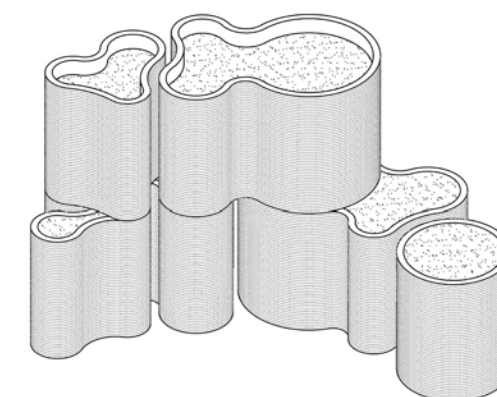
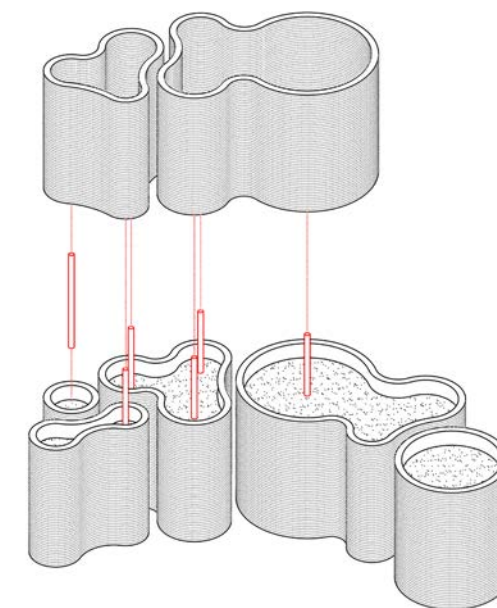
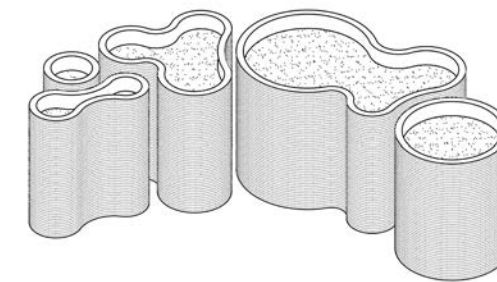
RIPETIZIONE DEL PROCESSO PER I LIVELLI SUCCESSIVI

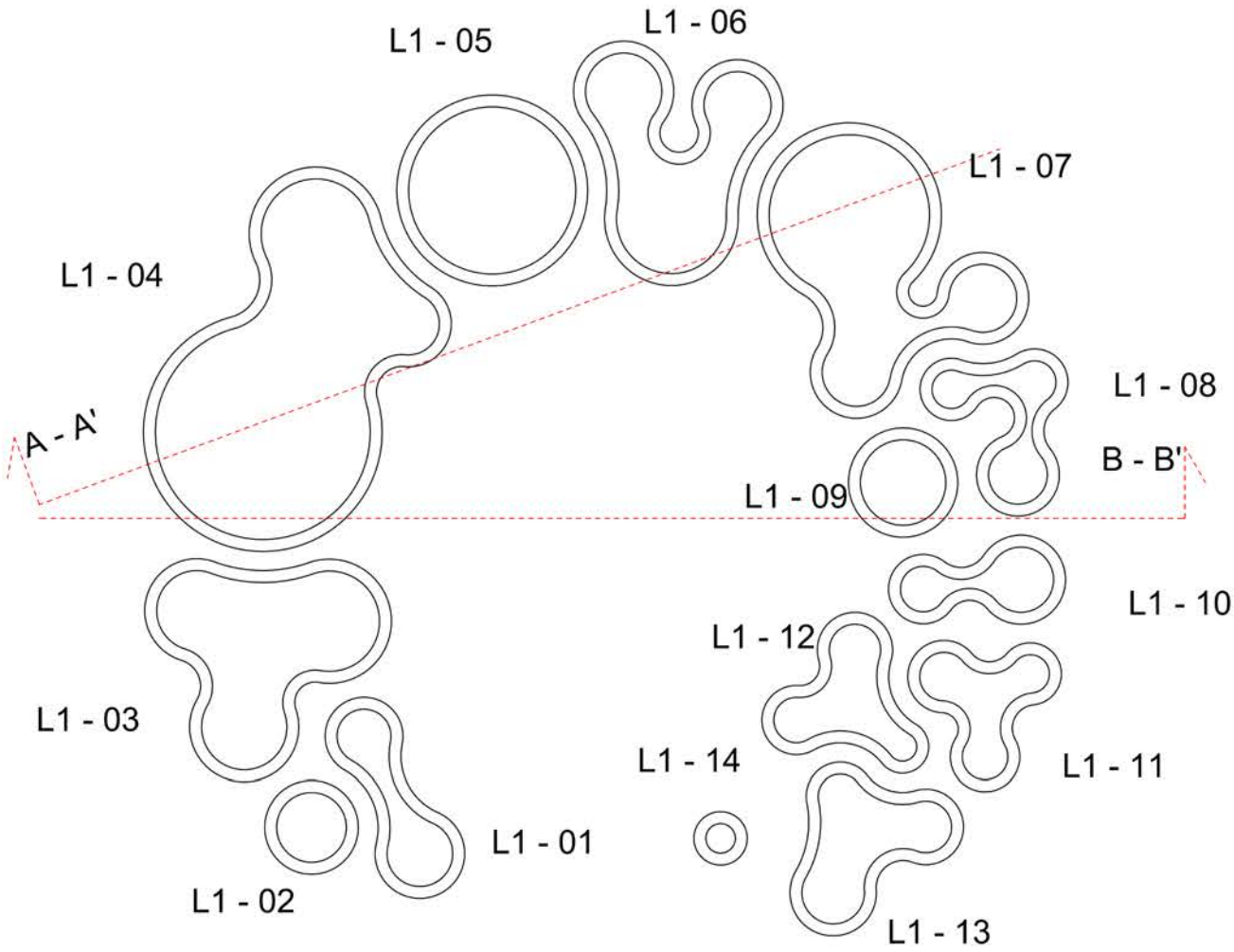
Questa operazione viene ripetuta per ogni livello della struttura, seguendo lo stesso schema di posizionamento, riempimento e inserimento delle canne di bambù, fino a raggiungere l'altezza finale del dimostratore. La ripetitività e la modularità del processo di montaggio permettono di costruire la struttura in

modo efficiente e controllato, garantendo la coerenza e la stabilità della struttura ad ogni livello.

Uno degli aspetti più interessanti di questo sistema costruttivo è la sua totale reversibilità. Poiché il montaggio avviene completamente a secco, senza l'uso di malte o altri leganti permanenti, è possibile smontare la struttura senza danneggiarne i componenti. La reversibilità offre anche un importante vantaggio in termini di impatto ambientale ovvero il riutilizzo dei materiali è facilitato, riducendo gli sprechi e promuovendo un ciclo di vita più sostenibile per l'intero progetto.

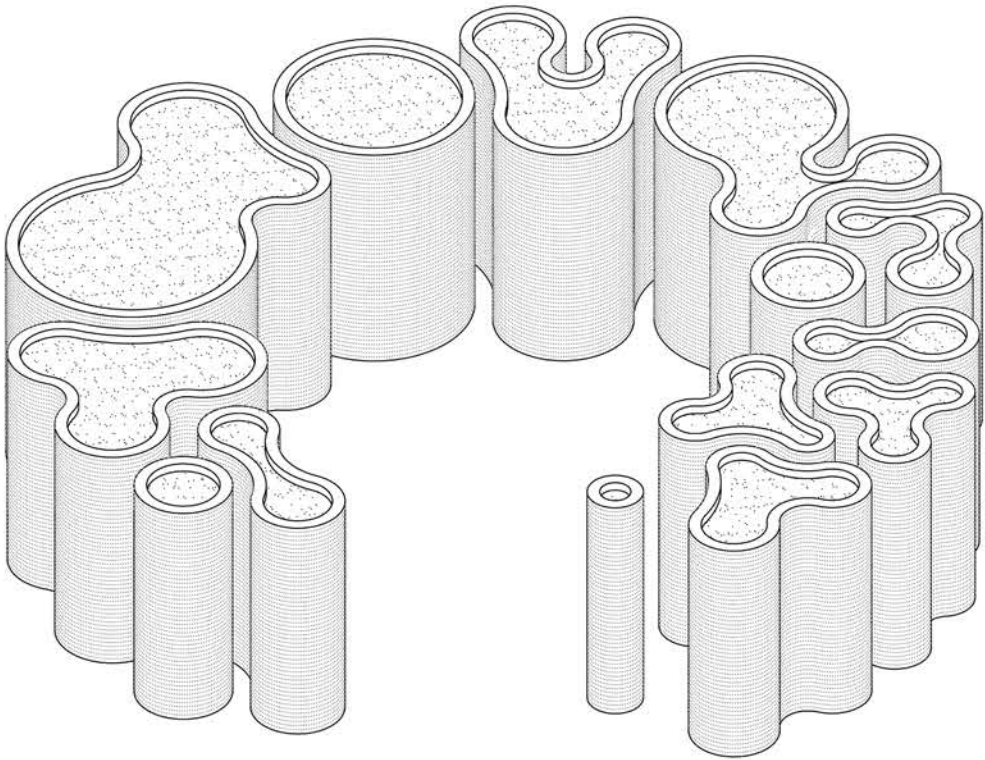
◀ Schema delle fasi consecutive di montaggio del dimostartore

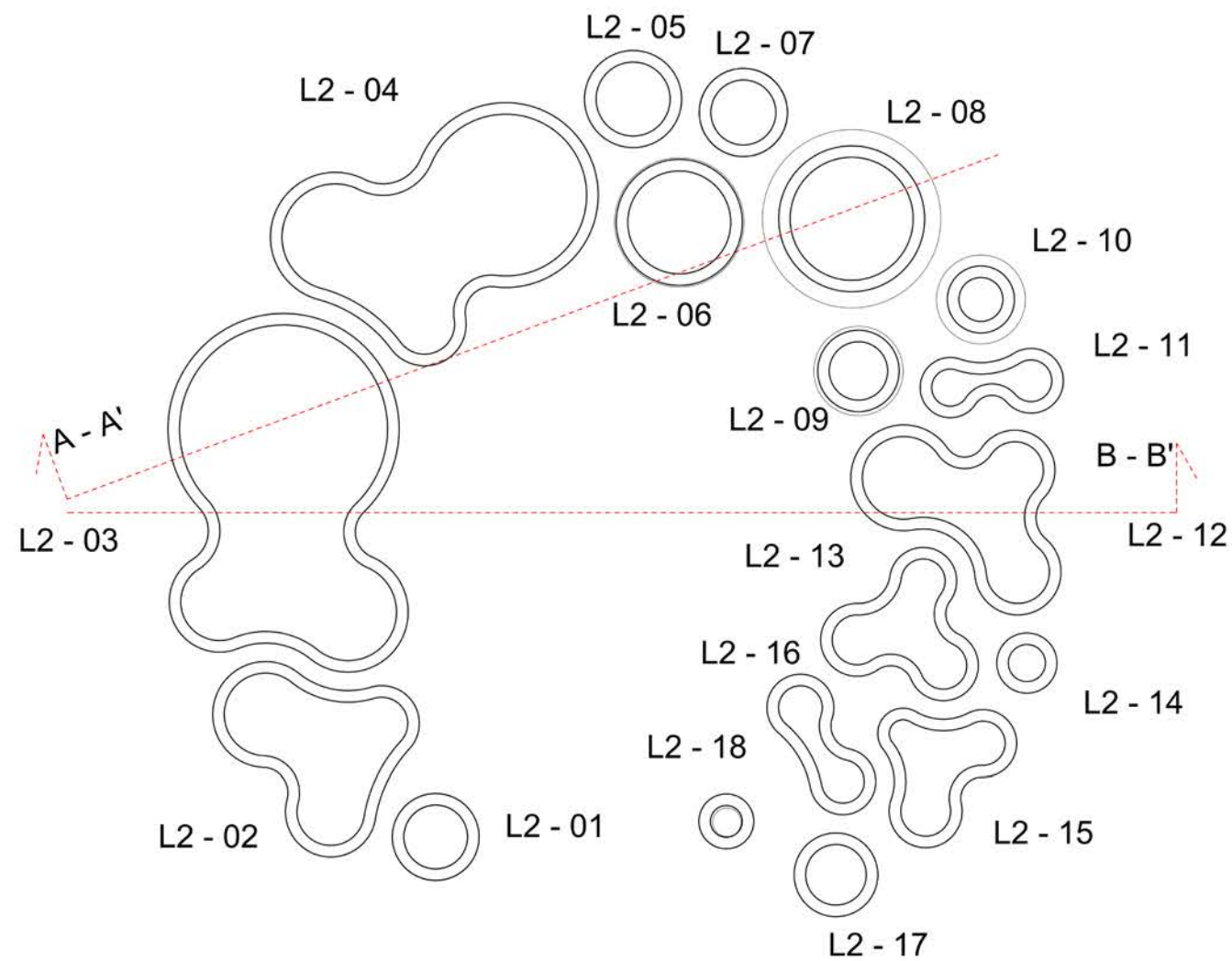




▲ Planimetria del primo livello di blocchi

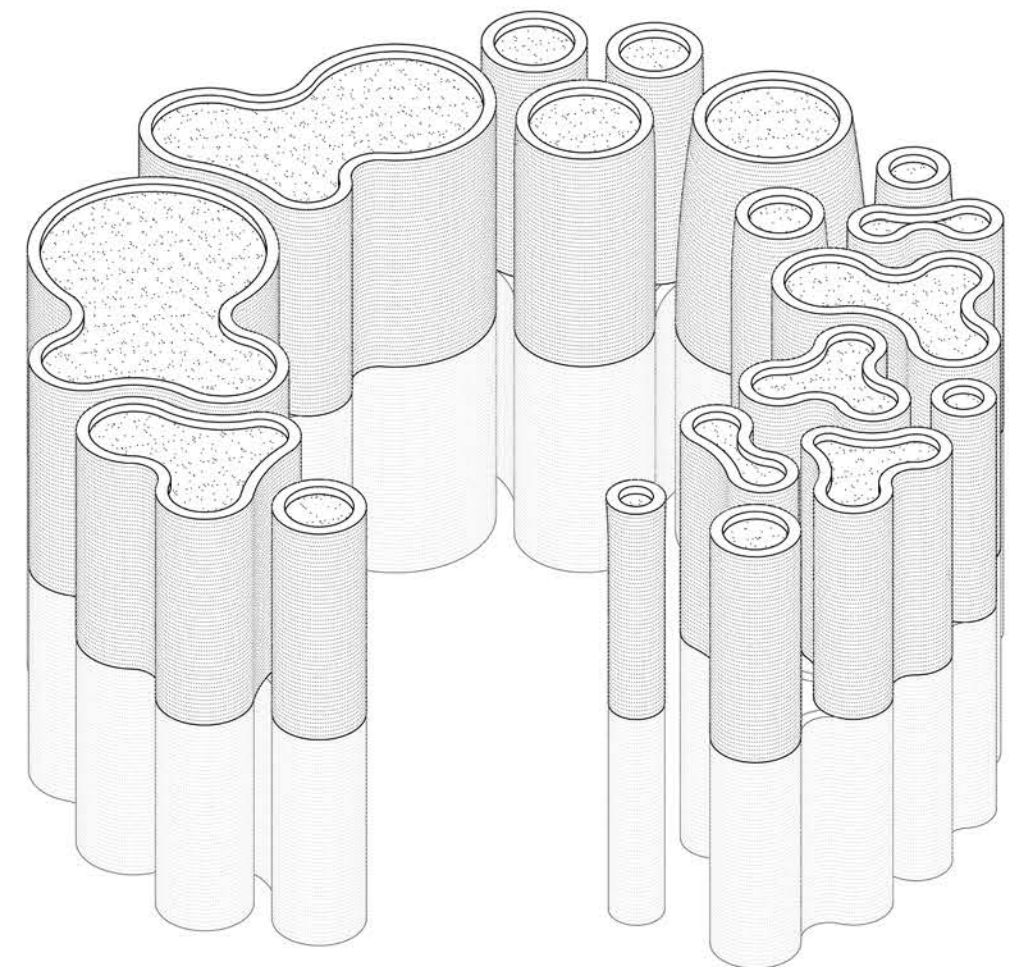
► Assonometria del primo livello di blocchi

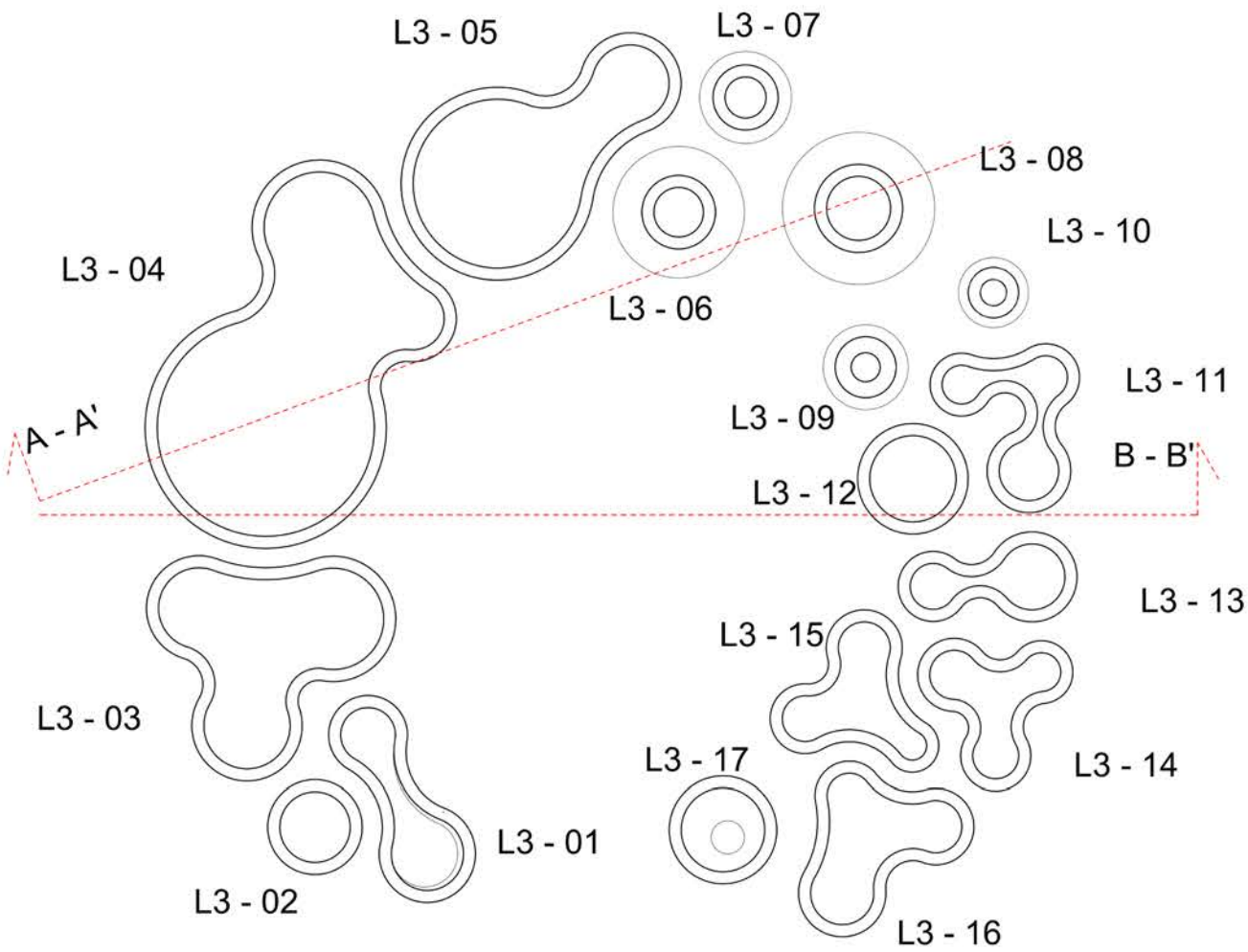




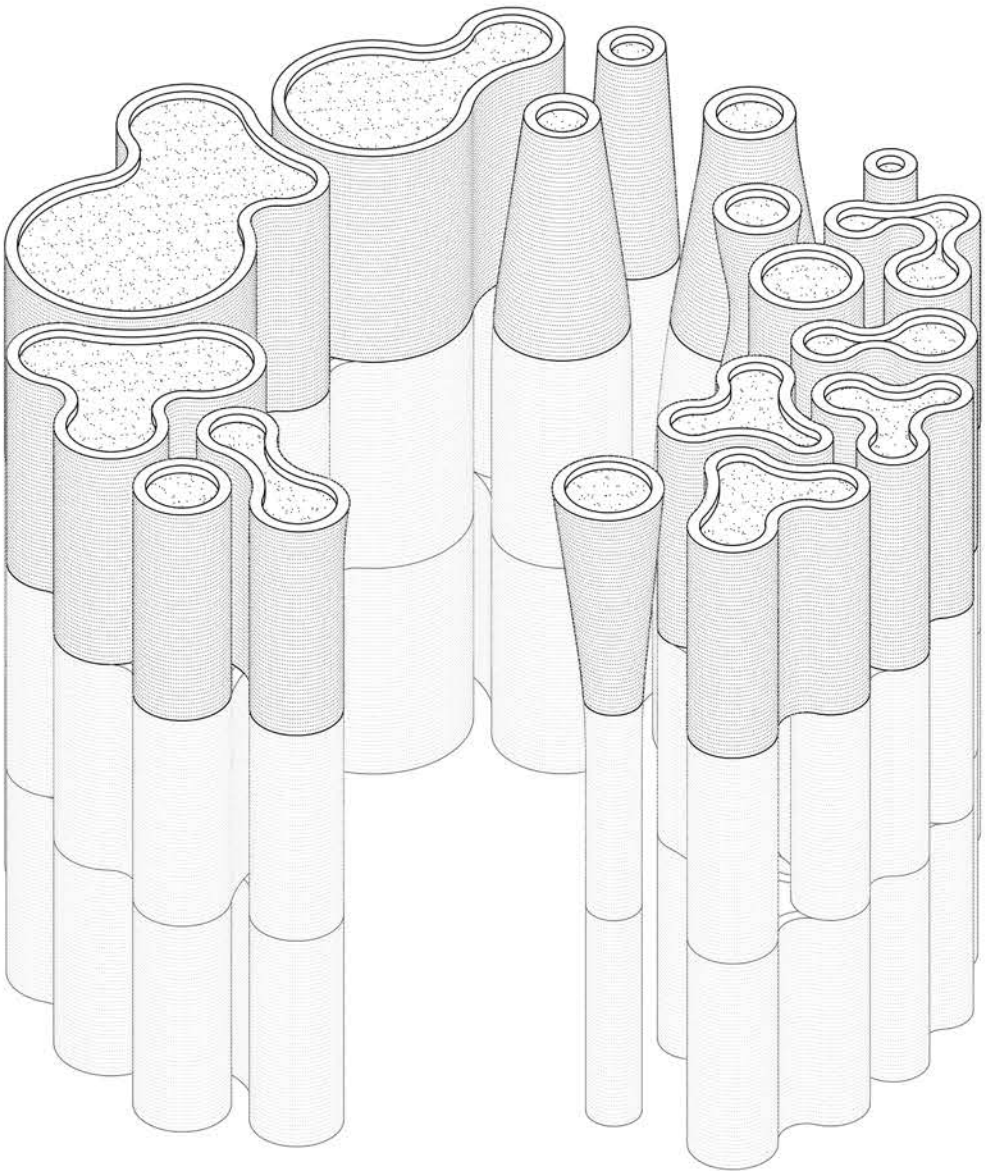
Planimetria del secondo
 livello di blocchi ▲

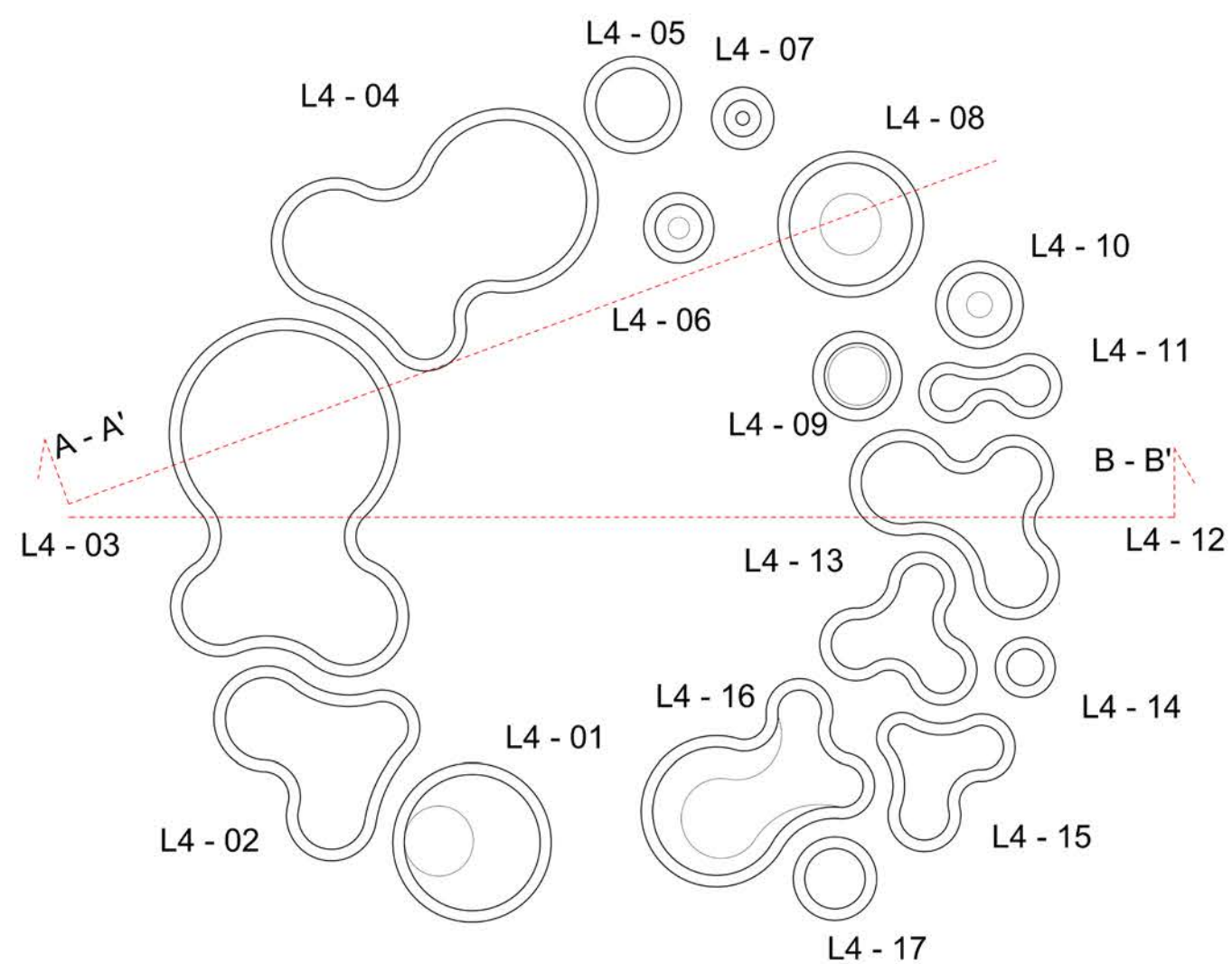
Assonometria del
 secondo livello di blocchi ►





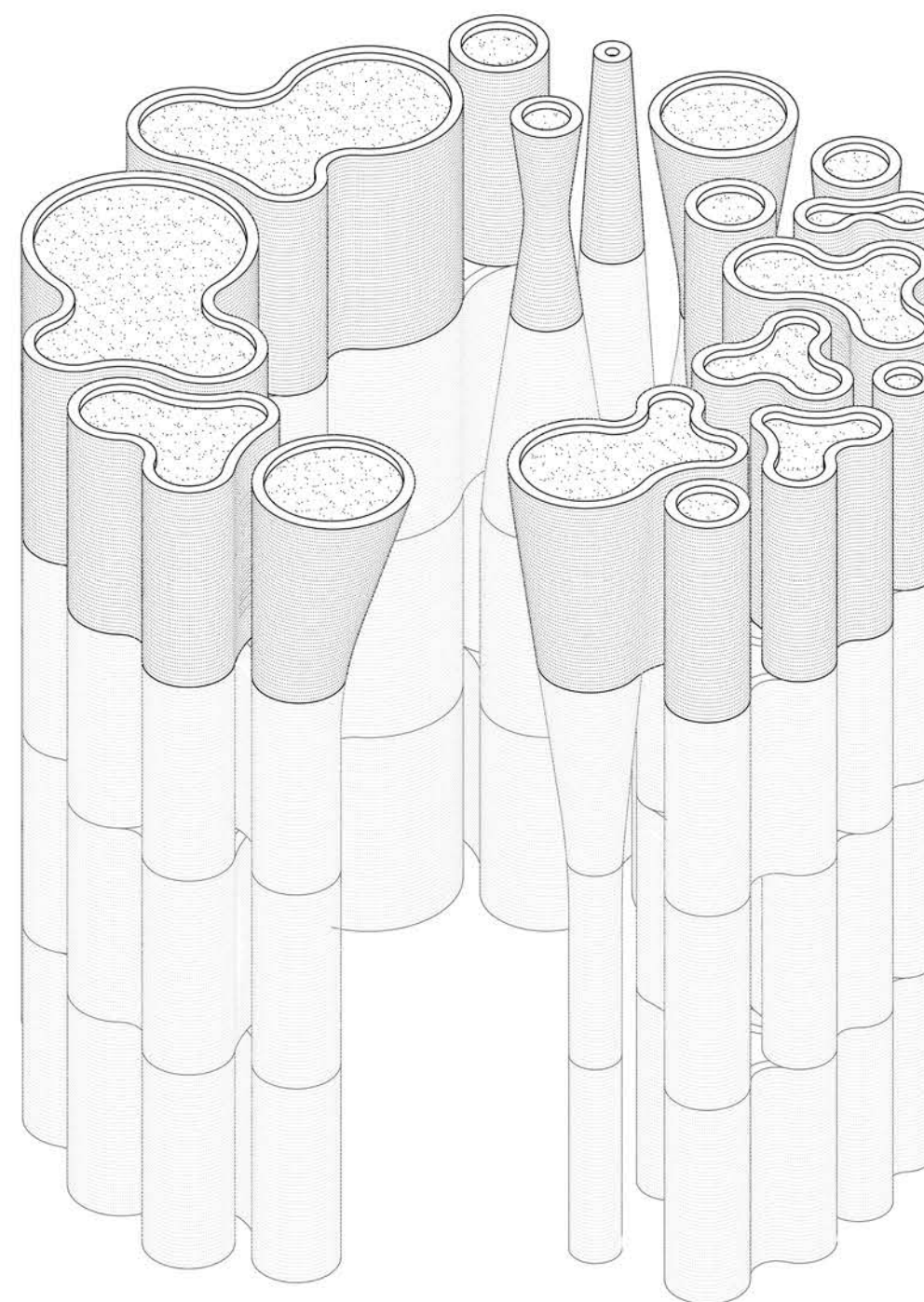
▲ Planimetria del terzo livello di blocchi
► Assonometria del terzo livello di blocchi

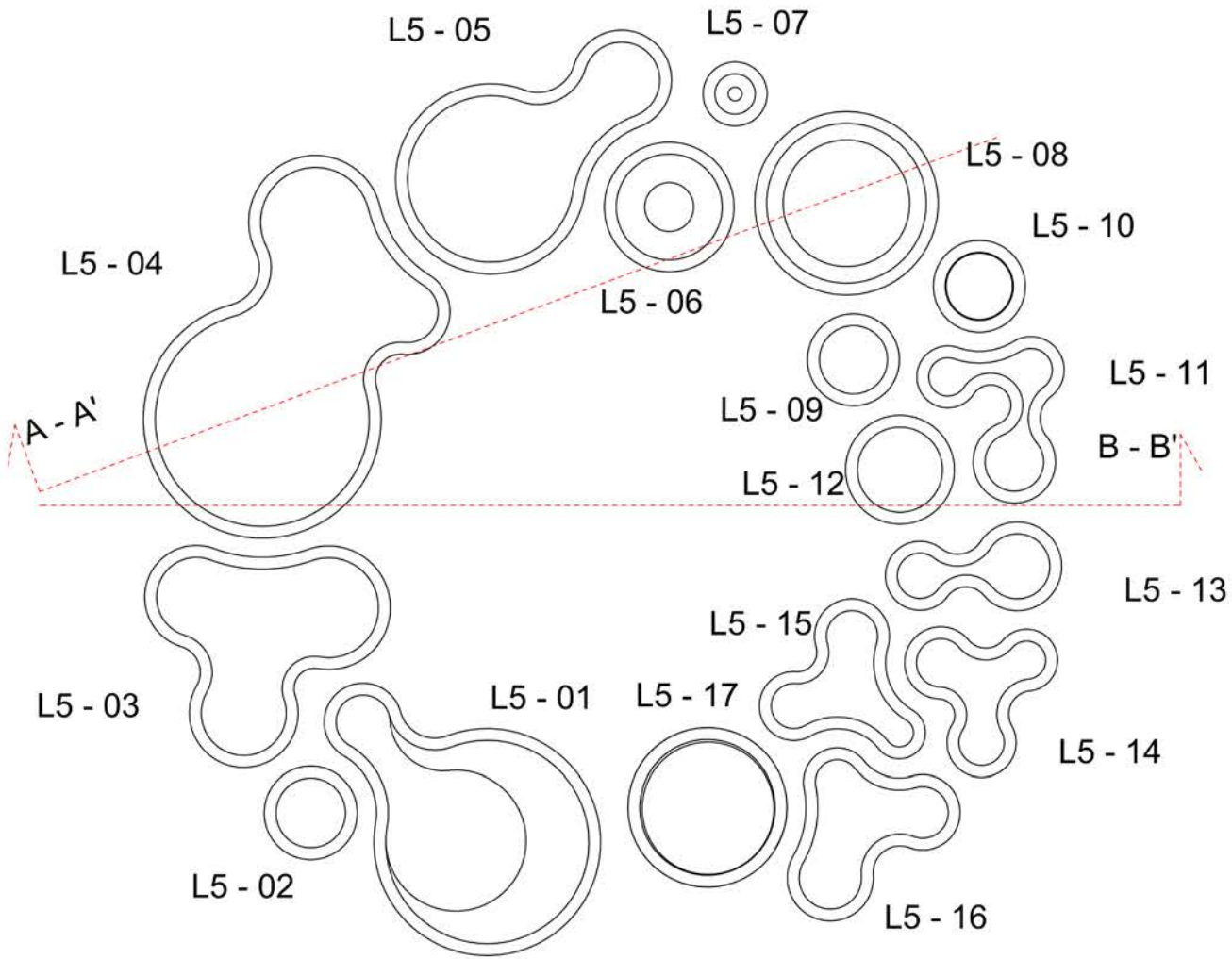




▲ Planimetria del quarto
 livello di blocchi

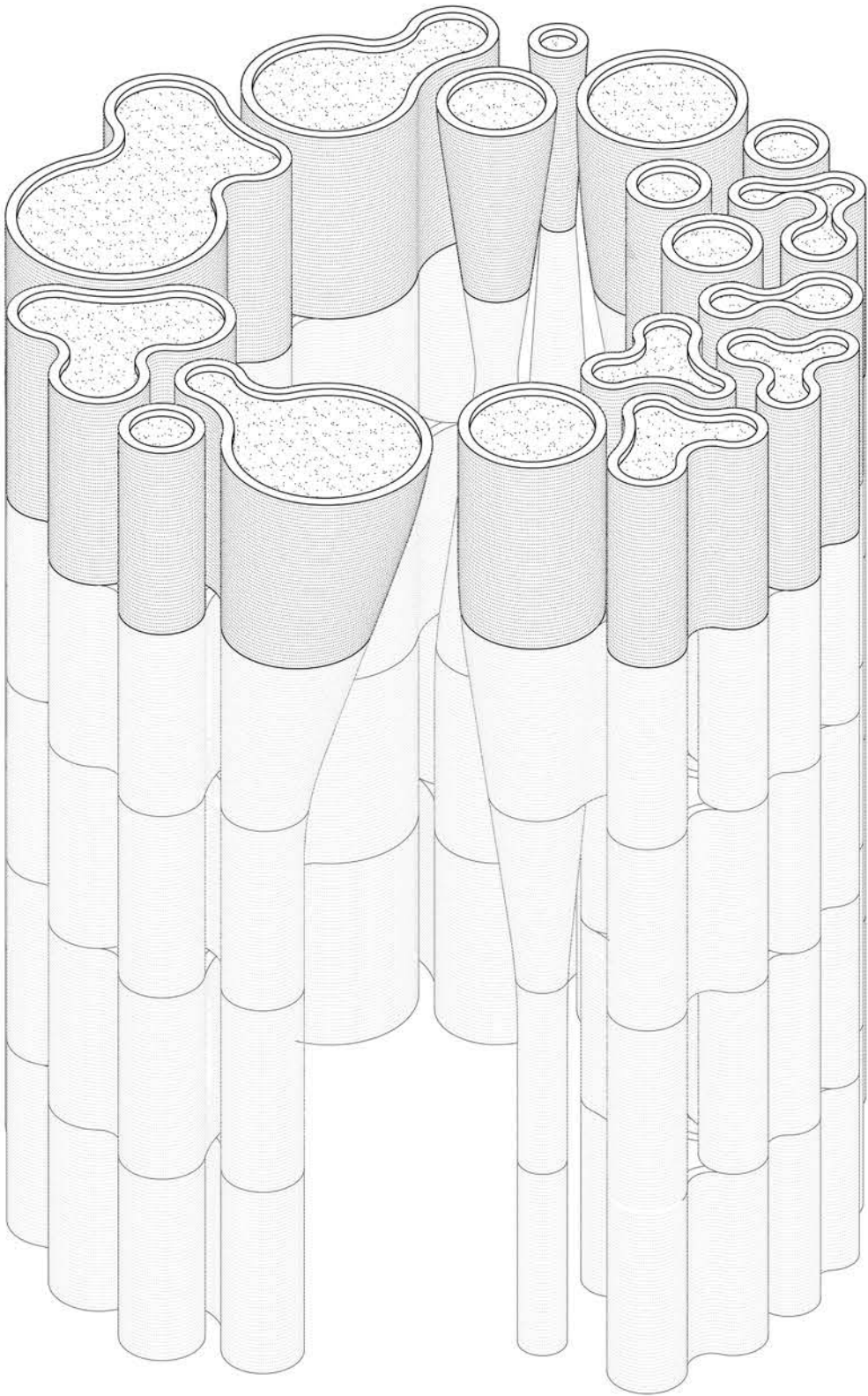
► Assonometria del quarto
 livello di blocchi

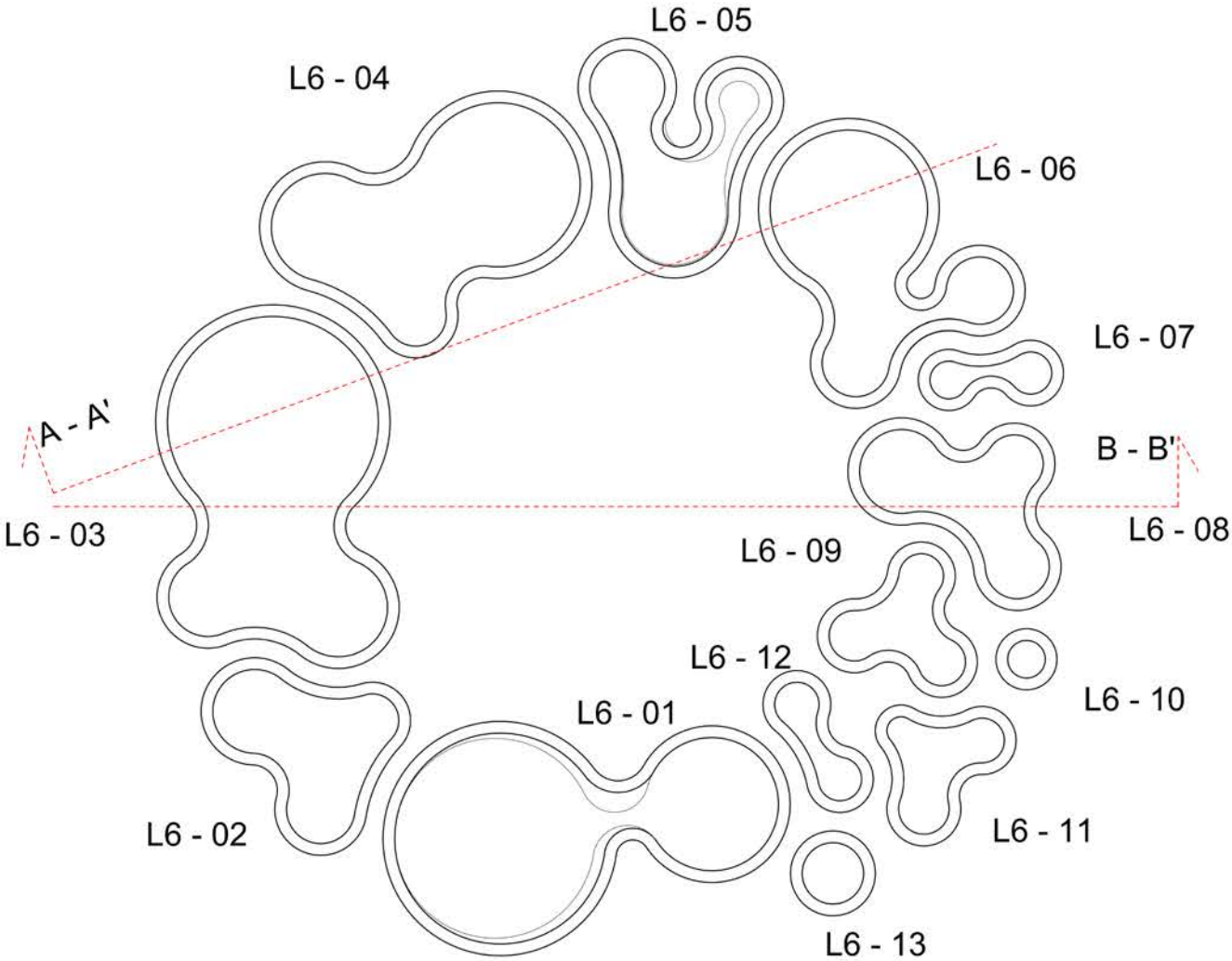




▲ Planimetria del quinto livello di blocchi

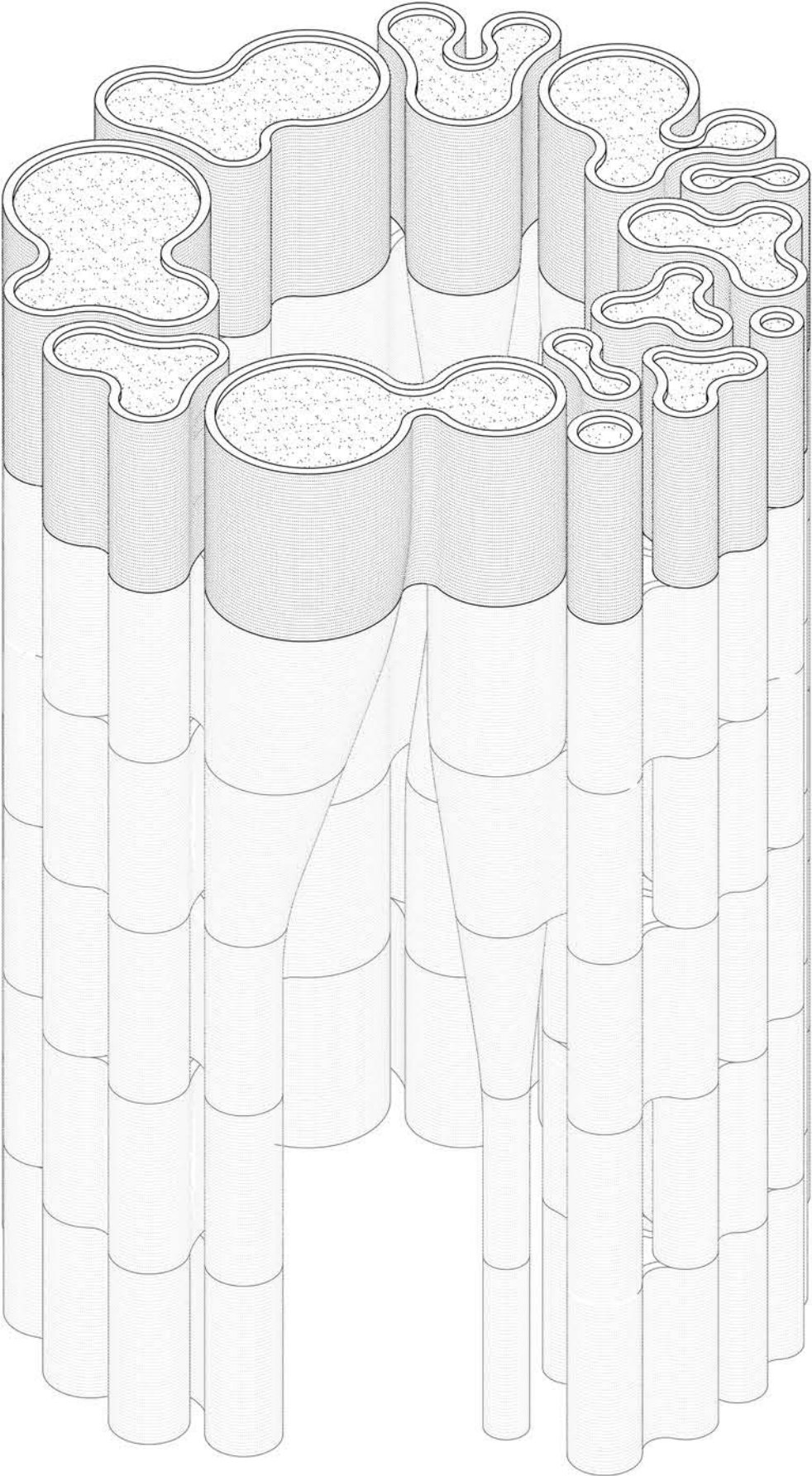
► Assonometria del quinto livello di blocchi





▲ Planimetria del sesto livello di blocchi

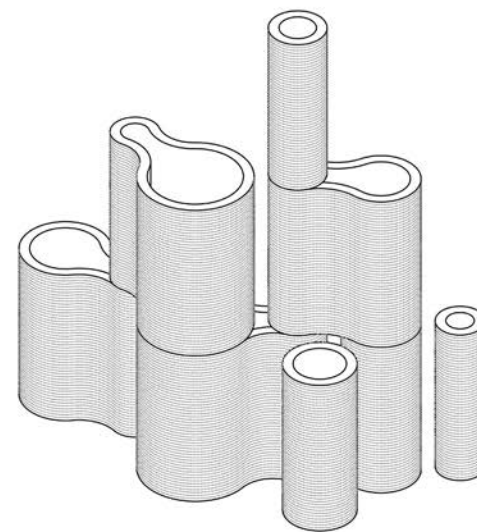
► Assonometria del sesto livello di blocchi



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Planimetrie
dell'elemento
ornamentale del
dimostratore



Assonometria
dell'elemento
ornamentale

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

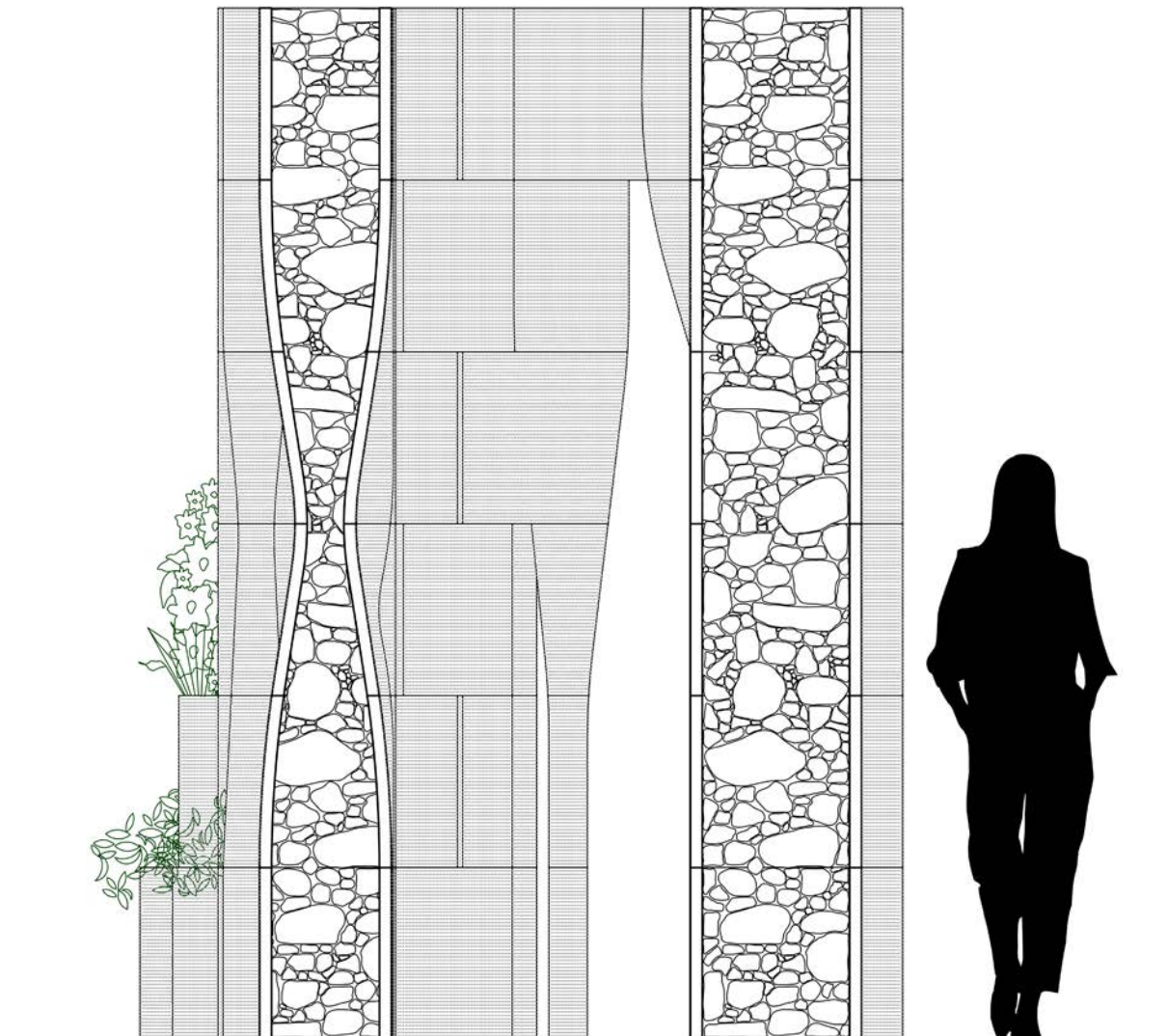
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Sezione AA'



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

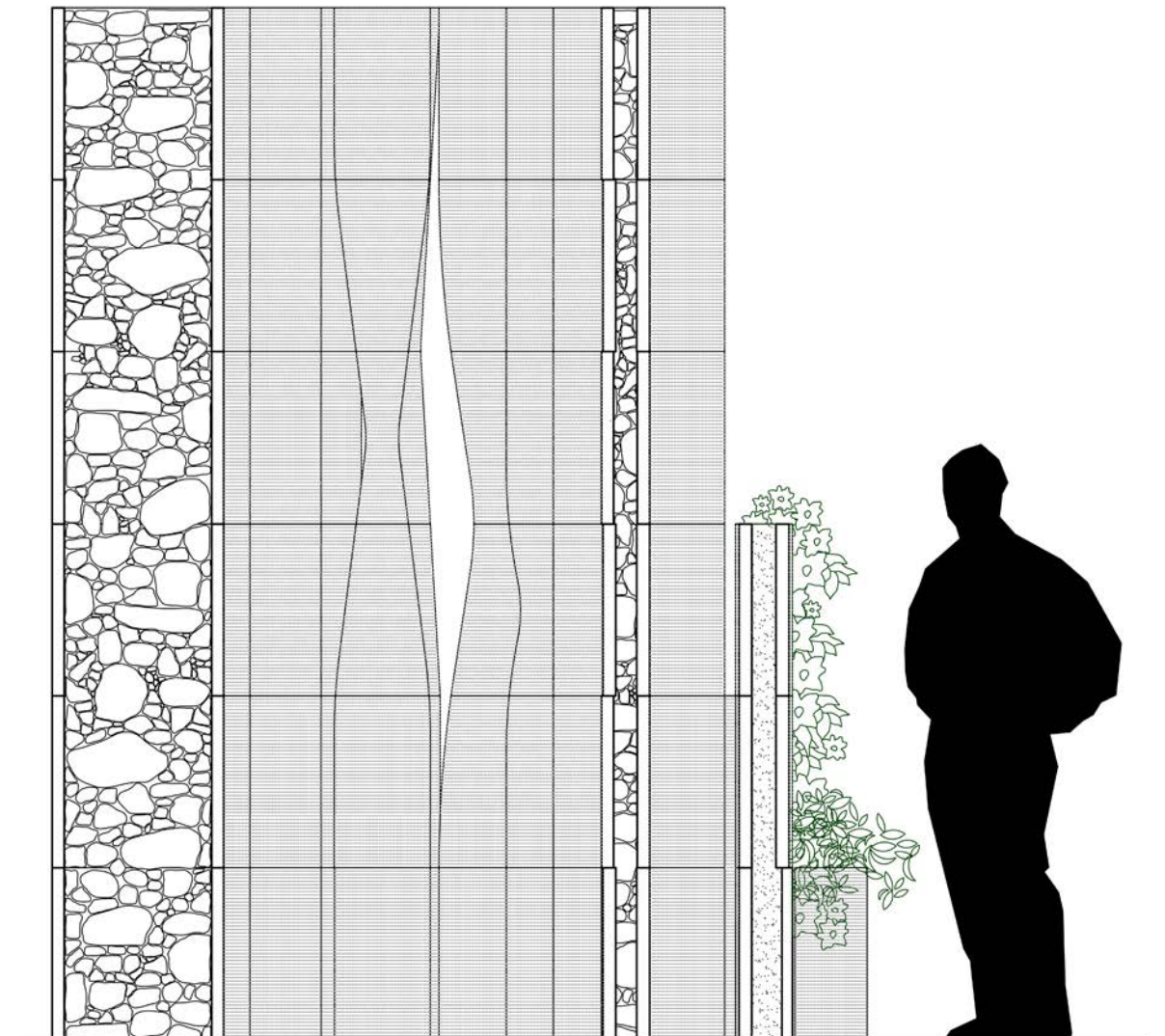
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

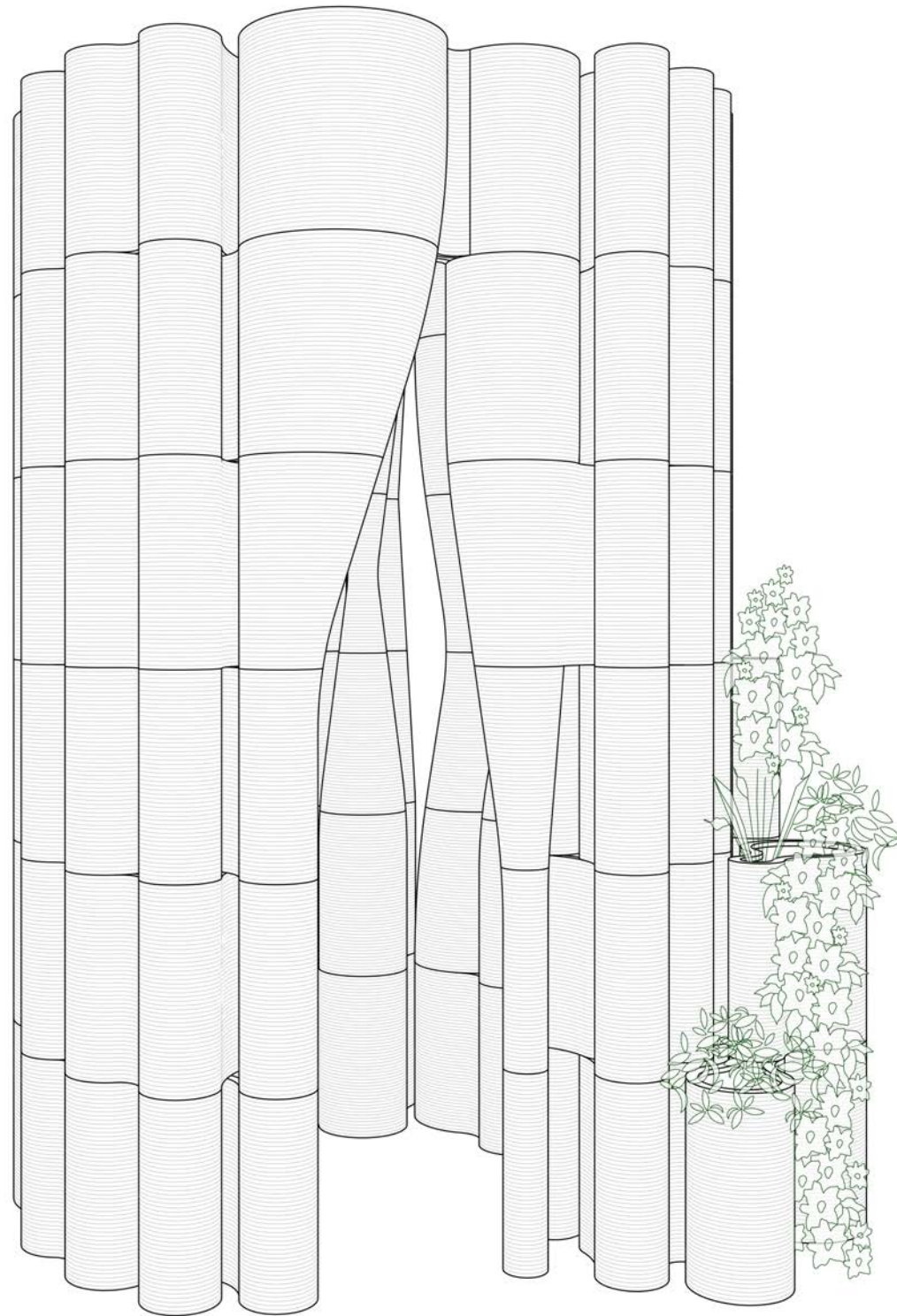
Sezione BB'



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Prospettiva



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

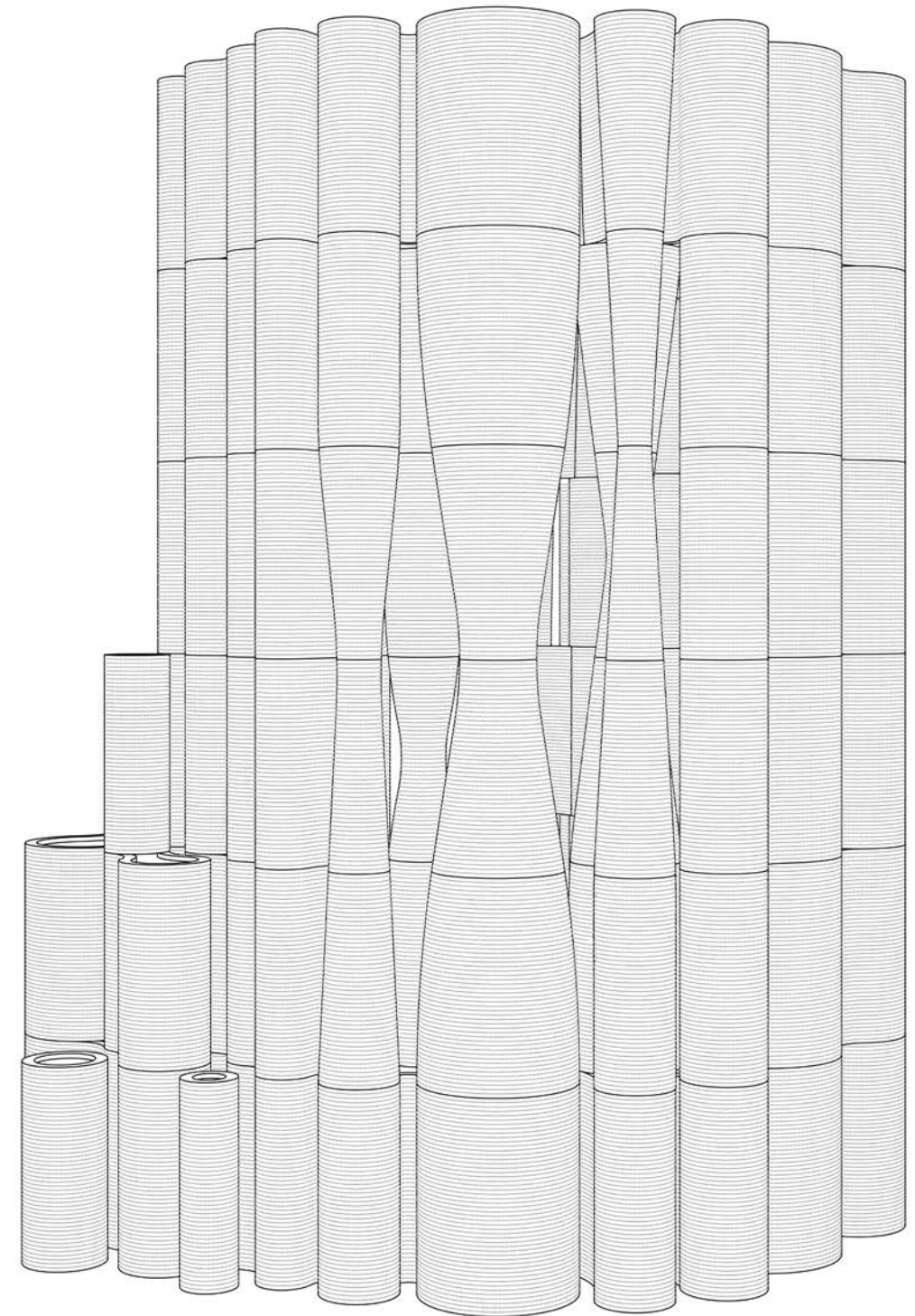
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

Prospettiva



7.6 LA REALIZZAZIONE

La prototipazione a scala reale è iniziata nel mese di aprile del 2024 ed è in corso di ultimazione. Essa è avvenuta presso il laboratorio di robotica della Casa delle Tecnologie Emergenti di Matera situata nell'Hub di San Rocco. Sito di installazione del dimostratore. La stampante utilizzata è la Delta Wasp 3MT Concrete. Il materiale utilizzato è l'RH4003D dell'azienda Rice House. Azienda italiana con sede a Milano.

Il materiale presenta questa composizione:

20% Calce, 45% Argilla, 30% Lolla di riso, 5% additivi (amido di mais, amido di riso, fecola di patate, paglia di riso). Il costo del materiale è di 0,85 €/kg più iva ed è consegnato in sacchi da 20 kg.

Le fasi di avvio della lavorazione sono cruciali per il corretto esercizio della macchina. Dopo aver montato l'estrusore e provveduto a collegare il sensore di pressione all'estrusore e al sistema di pompaggio, viene alimentata la stampante e la pompa. È sistemato il piano di stampa composto da un pianale di legno montato su di un pallet. Tale accorgimento è utile per consentire la rimozione dell'oggetto stampato a fine processo con l'ausilio di un transpallet. In seguito, viene applicato del distaccante sulle parti meccaniche del sistema di pompaggio e viene lubrificato il tubo che consente il trasporto del materiale all'estrusore. Il materiale viene lavorato dai 4 ai 6 minuti in una impastatrice con 5,5 litri di acqua per 20 kg prima di essere inserito nel sistema di pompaggio. Dalle prove effettuate è risultato indispensabile avviare il processo solo dopo aver miscelato secondo le tempistiche necessarie almeno 40kg di materiale. Come da scheda tecnica del materiale e della stampante, la temperatura ambientale di esercizio e di applicazione del materiale va dai 5° ai 30°. In seguito, il materiale è versato nel sistema di pompaggio. Viene avviata l'impostazione di estrusione per consentire di riempire il circuito di carica del materiale. Inserito il GCode, è avviato il processo di stampa. Il

GCode è stato codificato su software di slicing Simplify 3D con i seguenti parametri principali:

Diametro Ugello: 25mm

Altezza layer: 8,5mm

Layer solidi superiori e inferiori: 0

Perimetri: 1 con modalità di stampa del perimetro esterno con movimento spiraliforme

Riempimento: 0%

Velocità di stampa: 55 mm/s

Per la realizzazione dell'intero dimostratore è necessaria la stampa di 100 blocchi e di ulteriori 8 per il modulo ornamentale affiancato. Gli elementi sono stati tabulati per sommare le ore di stampa necessarie per la realizzazione dell'intera opera e il materiale necessario. Tali parametri sono stati calcolati risalendo alla distanza di estrusione di ogni singolo blocco. Risultano necessarie 32 ore di stampa effettive. Tale parametro però può sembrare fuorviante perché non tiene in considerazione il tempo necessario per la fase di avvio del processo di stampa e il tempo necessario per la fase di pulizia a fine processo. Queste tempistiche sono approssimate a 2 ore complessive con team di lavoro composto da tre persone. Alla data odierna sono stati realizzati completamente i primi due livelli. Nei restanti quattro livelli la maggior parte delle conformazioni dei blocchi si ripete eccetto in occasione dei blocchi che compongono i varchi. Tale aspetto, quindi, certifica la fattibilità dell'intero progetto che è in fase di ultimazione. In occasione del Master 3D Printing Architecture svolto presso la Casa delle Tecnologie Emergenti di Matera nel mese di agosto del 2024, si è effettuata una prova di montaggio dei blocchi stampati di cui sono riportate delle fotografie.

Angelo Vito Graziano
Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Fasi di preparazione
dell'impasto



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Fasi di carico
dell'impasto nel sistema
di pompaggio



Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Fasi di carico
 dell'impasto nel sistema
 di estrusione della
 stampante



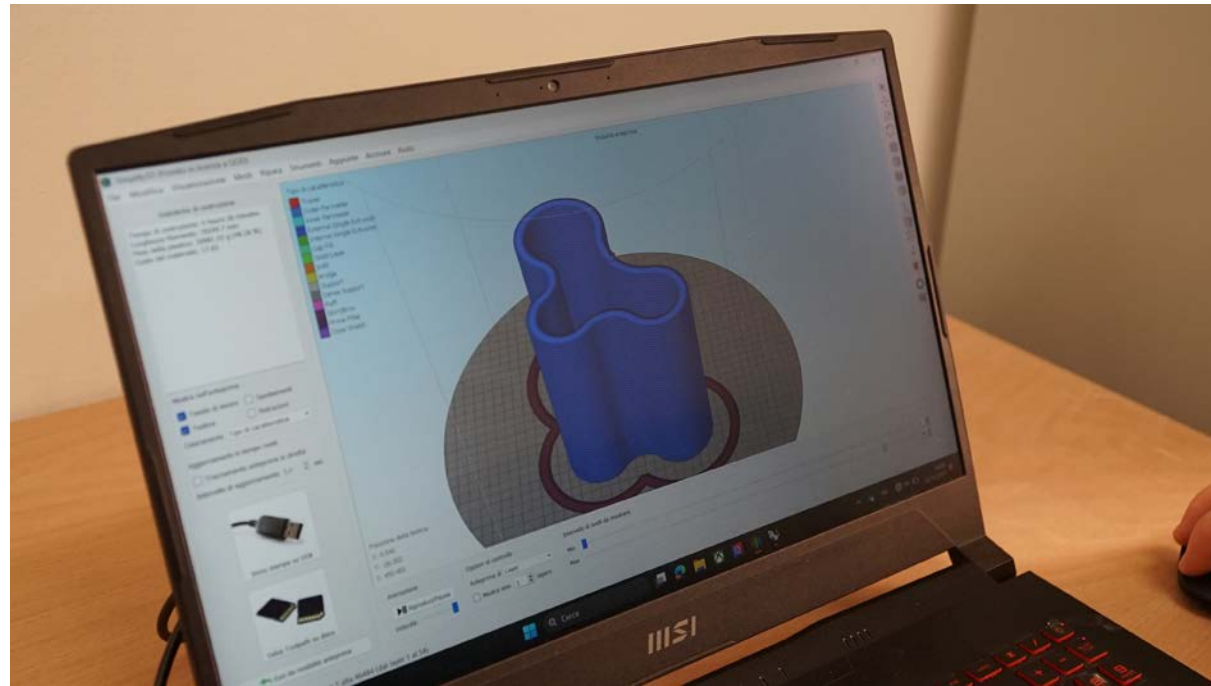
Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Fasi di stampa dei
 blocchi



Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Il blocco stampato (in basso) e il suo digital twin (in alto) nella fase di codifica del percorso macchina



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Ultimata la stampa il blocco è trasportato fuori dall'area di esercizio della stampante e lasciato essiccare



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Alla pagina corrente e
alle pagine seguenti:
Prove di montaggio
dei blocchi stampati
a seguito della fase di
essiccazione



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano
 Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
 Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
 XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
 Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"



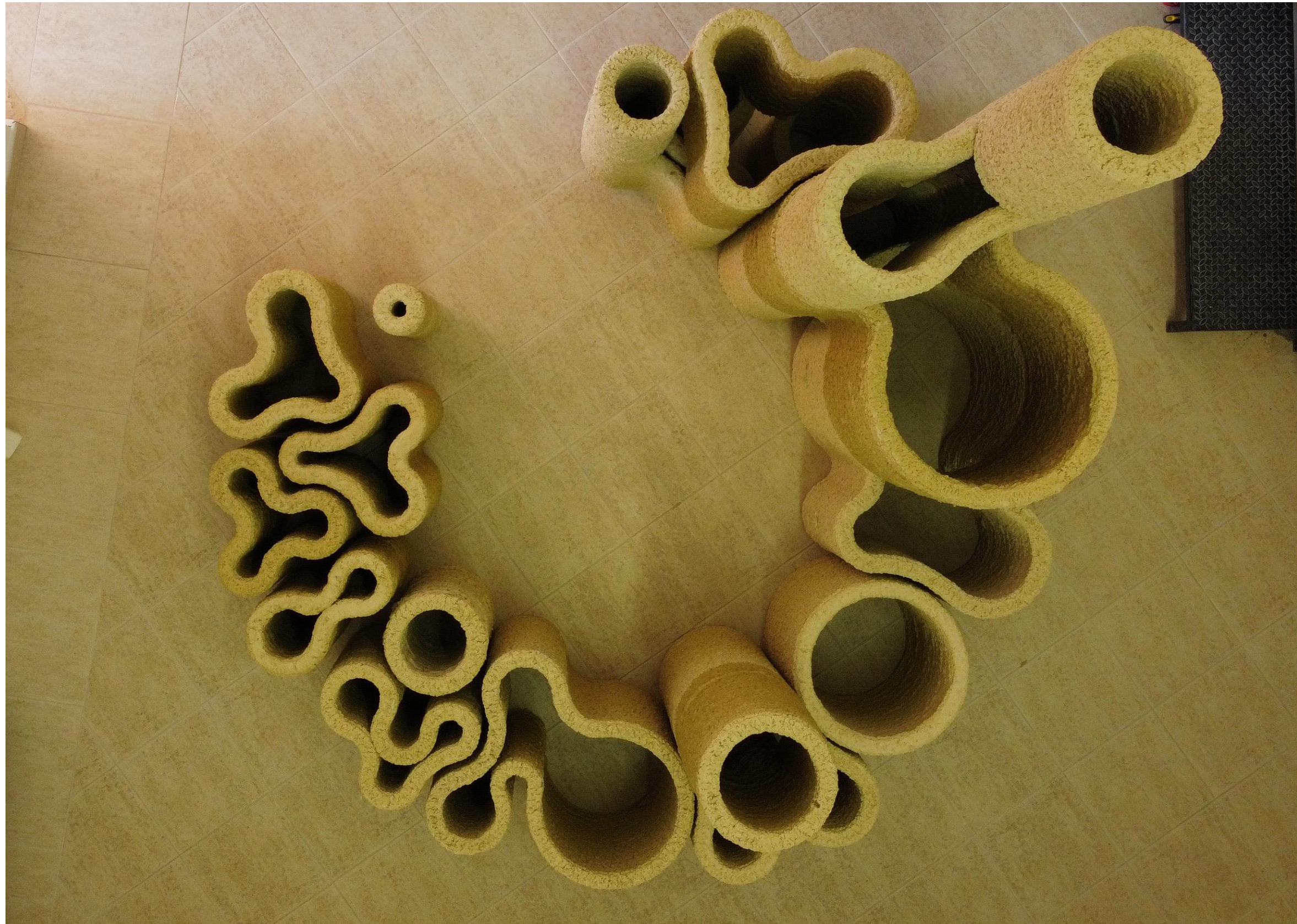
Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



Angelo Vito Graziano

Forme innovative in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor



Alla pagina corrente e
alla pagina seguente:
Fotografie di dettaglio
dei blocchi assemblati



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"



8 CONSIDERAZIONI FINALI

La stampa 3D rappresenta una tecnologia emergente e dirompente nel settore delle costruzioni, con un potenziale significativo per trasformare i metodi tradizionali e aprire nuove possibilità progettuali, tecniche e ambientali. Questa tesi ha esplorato l'applicazione della stampa 3D in terra cruda per l'ambiente esterno pubblico, dimostrando come tale tecnologia possa offrire soluzioni innovative per affrontare le sfide contemporanee della sostenibilità e del design.

L'exkursus storico presentato nella sezione prima della tesi ha avuto lo scopo di posizionare il processo additivo del Material Extrusion all'interno delle possibili tecniche costruttive in terra cruda rinnovando e riattualizzando l'immenso patrimonio storico architettonico legato a questo materiale. Come è emerso dai casi studio e dall'analisi delle applicazioni attuali, la tecnologia additiva consente di ridurre l'impatto ambientale attraverso l'uso di materiali sostenibili, minimizzando gli sprechi e ottimizzando l'uso delle risorse.

Nella seconda sezione, le sperimentazioni pratiche realizzate in prima persona nei laboratori del Politecnico di Bari - come il FabLab Poliba - e nell'azienda italiana WASP, hanno messo in luce come la stampa 3D non sia solo un mezzo tecnico, ma un catalizzatore di cambiamento che sfida lo status quo consolidato del settore edile, sia in termini progettuali che in termini produttivi. Questa riflessione entra all'interno della disciplina del progetto richiamando una maggiore consapevolezza da parte del mondo professionale verso i processi produttivi contemporanei.

Infine nella terza sezione sono presentati i risultati della ricerca che si sostanziano in un modello utile per la progettazione di spazi con questa tecnologia. Forma, materiale e funzione sono caratterizzati da relazioni dirette con il processo produttivo che pertanto contraddistingue la fase progettuale. Inoltre, grazie alla realizzazione di un dimostratore architettonico, tale modello si materializza dando prova di come sia possibile offrire soluzioni innovative a problemi di carattere sociale e ambian-

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)
Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4
"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

tale.

Nonostante i progressi significativi, la stampa 3D affronta ancora numerose sfide tecniche e sociali. La mancanza di regolamentazioni specifiche, la difficoltà di integrare tecnologie additive nei processi di costruzione tradizionali e la necessità di formare una forza lavoro adeguatamente preparata rappresentano ostacoli che richiedono un approccio collaborativo. È evidente che la stampa 3D richiede un cambiamento sistemico, che coinvolga non solo gli architetti e gli ingegneri, ma anche le istituzioni, le comunità e le industrie.

Sul piano sociale, la stampa 3D ha il potenziale di ridurre le disuguaglianze, ma rischia di esacerbarle se l'accesso alla tecnologia rimane limitato a una cerchia ristretta di esperti e professionisti. L'educazione e la democratizzazione della conoscenza tecnologica sono dunque fattori essenziali per garantire che questa innovazione possa avere un impatto inclusivo e positivo.

Il futuro della stampa 3D in architettura è strettamente legato alla capacità di superare le limitazioni attuali e di integrare materiali e tecnologie in modo sinergico. Per realizzare appieno il potenziale della stampa 3D nell'architettura, è necessaria una visione olistica che vada oltre la semplice adozione tecnologica. La stampa 3D non deve essere vista come una soluzione isolata, ma come parte di un sistema integrato che include materiali, processi, norme e comunità. Solo attraverso una stretta collaborazione tra ricerca accademica, industria e politiche pubbliche sarà possibile affrontare le sfide e cogliere le opportunità offerte da questa tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory, ed. 2022. *Living Prototypes*. Edited by Kristin Feireiss. Berlin: Aedes Network Campus Berlin.

Barberio, M., *Nuove frontiere dell'architettura in pietra. Progettazione parametricocomputazionale, fabbricazione digitale e costruzione*, tesi di dottorato, Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design, Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria civile e dell'Architettura (DICAR), Dottorato di Ricerca in Architettura: Innovazione e Patrimonio, Consorzio Argonauti (Politecnico di Bari e Università degli Studi Roma Tre), XXX ciclo (2015-2017), tutor: prof. Giuseppe Fallacara.

Barberio, M., & Colella, M., *Architettura 4.0. Fondamenti ed esperienze di ricerca progettuale*, Maggioli Editore, 2020.

Cacciatore F.; *Il muro come contenitore di luoghi. Forme strutturali cave nell'opera di Louis Kahn*, Lettera Ventidue Editore; 2008.

Carneau, P., Mesnil, R., Roussel, N., & Baverel, O. (2020). *Additive Manufacturing of Cantilever - From Masonry to Concrete 3D Printing*. Automation in Construction, 116, 103184.

Carvalho, J., Figueiredo, B., & Cruz, P. (2019). *Free-form Ceramic Vault System: Taking Ceramic Additive Manufacturing to Real Scale*. In Proceedings of eCAADe 37 / SIGraDi 23 (pp. 485-492).

Crump, S. S., *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*, 1992, brevetto US512329.

Cruz, P. J. S., Figueiredo, B., Carvalho, J., & Campos, T. (2020). *Additive Manufacturing of Ceramic Components for Façade Construction*. Journal of Facade Design & Engineering, 8(1).

Cucinella, M.; *Il futuro è un viaggio nel passato. Dieci storie di architettura*, Quodlibet; 2021.

Grigoriadis, K., & Lee, G., *Construction and Design Manual 3D Printing and Material Extrusion in Architecture*, DOM editori, 2024.

Delgado Camacho, 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.

Dethier, J; *Architetture di terra*, Mondadori Electa; 1982.

Dethier, J, *The Art of Earth Architecture: Past, Present, Future*. Thames & Hudson Ltd, 2020.

Dubor, A., Cabay, E., & Chronis, A., (2018). *Energy Efficient Design for 3D Printed Earth Architecture*. In K. De Rycke et al., Humanizing Digital Reality, (pp. 383–393). Springer Nature Singapore Pte Ltd.

Fallacara, G., Il paradigma stereotomico nell'arte del costruire. Dalla natura sincretica della modellazione digitale alla progettazione/costruzione di elementi architettonici in pietra da taglio, tesi di dottorato, Politecnico di Bari, Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria civile e dell'Architettura (ICAR), Dottorato di Ricerca in Progettazione Architettonica per i Paesi del

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD) Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025) Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4 "Dottorati su tematiche dell'innovazione"

Mediterraneo, XVI ciclo (novembre 2000-novembre 2003), tutor: prof. Claudio D'Amato Guerrieri.

Fallacara, G., Restucci, A. (a cura di), *Claudio D'Amato Guerrieri e la "scuola barese" di architettura. A trent'anni dall'istituzione del Politecnico di Bari e della Facoltà di Architettura*, Roma, Gangemi Editore, 2020.

García Cuevas, D., & Pugliese, G., *Advanced 3D printing with Grassopper*. Clay and FDM, autopubblicazione, 2020.

Graziano, A. V., Cavaliere, I., Costantino, D., Fallacara, G., Parisi, N., *Additive Manufacturing in Architecture: 3D Printing Solutions for Vaulted Spaces*, in Escalante-Garcia, J. I., Castro Borges, P., Duran-Herrera, A (a cura di), Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021, atti della International Conference on Advances in Sustainable Construction Materials and Structures (Mérida, Messico, 30 agosto – 3 settembre 2021), Cham, Springer, 2023, pp. 407-414.

Georgiadis, T., Barbera, G., Carotenuto, F., Lenzi, J., Motisi, A., & Rossi, F. (2014). *How a traditional agricultural protection structure acts in conditioning the internal microclimate: A statistical analytical approach to Giardino Pantesco (Pantelleria Island - Italy)*. Italian Journal of Agrometeorology, 1, 41-58.

Heringer, A., Howe, L.B., & Rauch, M.; *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*; 2019.

Houben, H., & Guillaud, H.; *CRATerre, Teate de construction en terre*, Edition sparentheses; 1991.

Hull, C. W., *Apparatus for production of three-dimensonal objects by stereolithography*, 1986, brevetto US4575330.

Khan, S. M., Sanchez, F., Zhou, H., *3-D printing of concrete: Beyond horizons, in Cement and Concrete Research*, vol. 133, 2020.

Khoshnevis, B., *Additive Fabrication Apparatus and Method*, 1996, brevetto US5529471.

Khoshnevis, B., Robotic Systems for Automated Construction, patent, United States, 2010.

Laureano, P.; *La piramide rovesciata. Il modello dell'oasi per il pianeta terra*, Bollati Boringhieri; 2013.

Moreno Nieto, D., & Moreno Sánchez, D. (2021). *Design for Additive Manufacturing: Tool Review and a Case Study*. Applied Sciences, 11(4), 1571

Moustafa, M. A. (n.d.). *Evaporative Cooling*. Al Asri Engineering Consultant.

Nordh, H., & Østby, K. (2013). *Pocket parks for people – A study of park design and use*. Urban Forestry & Urban Greening, 12(1), 12-17

Parisi, N. (2008). SINAN. Progetto e costruzione dello spazio cupolato ottomano / Design and construction of the Ottoman domed space (2ª ed.).

Angelo Vito Graziano

Forme innovate in terra stampata per il progetto urbano e il benessere outdoor

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)

Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio

XXXVII ciclo (Gennaio 2022 - Gennaio 2025)

Dottorato di ricerca PON "Ricerca e Innovazione" 2014-2020 Azione IV.4

"Dottorati su tematiche dell'innovazione"

Parisi, N.; *Self Made Architecture 01*, Edizioni di Pagina, 2015.

Parisi, N.; *Self Made Architecture 02/03*, Edizioni di Pagina, 2020.

Parisi, N. (2020). *Formare per trasformare. Il progetto architettonico dal CAD al CAM* [Training for Evolving. The Architectural Project from CAD to CAM]. in_bo. Architecture Today, 11(5).

Parisi, N. (2020). *Do It Yourself and 'digital fabrication' for new way of founding life*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 588(1), 032084

Parisi, N., Tina, G., & Graziano, A. V. (2022). *Raw earth & additive manufacturing: Two case studies*. Intervento presentato al convegno XX International Forum "Le Vie dei Mercanti", Napoli/Capri, Italia, 8-10 settembre 2022.

Parisi, F., Sangiorgio, V., Parisi, N., Mangini, A. M., Fanti, M. P., & Adam, J. M. (2023). A new concept for large additive manufacturing in construction: Tower crane-based 3D printing controlled by deep reinforcement learning. Construction Innovation.

Parisi, N.; FabLab Poliba. Laboratorio di fabbricazione digitale, Gangemi Editore, 2023.

Pegna, J., *Application of Cementitious Bulk Materials to Site Processed Solid Freeform Construction, in Proceedings of the Sixth International Solid Freeform Fabrication Symposium* (Austin. Texas, 7-9 Agosto 1995), 1995, pp. 39-45.

Pegna, J. *Exploratory investigation of solid freeform construction*, in Automation in Costruction, n. 5, 1997, pp. 427-437.

Rael, R., & Sanfratello, V., *Printing architecture. Innovative recipes for 3D printing*, Princeton Architectural Press, 2017.

Roschli, A., Gaul, K. T., Boulger, A. M., Post, B. K., Chesser, P. C., Love, L. J., Blue, F., & Borish, M. (2019). *Designing for Big Area Additive Manufacturing*. Additive Manufacturing, 25, 275–285.

Sangiorgio, V., Parisi, F., Fieni, F., & Parisi, N. (2022). *The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries*. Sustainability, 14(2), 598.

Tavoletti, C., *Case fatte di Sole. Vite possibili per architetture immaginate*, Lettera Ventidue Edizioni, 2021.

Venezia, F.; & Petrusch G., *La Torre d'Ombre, o, L'Architettura delle apparenze reali*, Fiorentino Editrice, 1978.