



Politecnico di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Stampa 3D per l'architettura. L'additive manufacturing applicato alla progettazione stereotomica

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Stampa 3D per l'architettura. L'additive manufacturing applicato alla progettazione stereotomica / Cavaliere, Ilaria. - ELETTRONICO. - (2024). [10.60576/poliba/iris/cavaliere-ilaria_phd2024]

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/268160> since: 2024-03-29

Published version

DOI:10.60576/poliba/iris/cavaliere-ilaria_phd2024

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura

L'additive manufacturing applicato alla progettazione stereotomica

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

Politecnico di Bari, XXXVI ciclo

Tutor: prof. Giuseppe Fallacara

Co-tutor: prof. Nicola Parisi





Department of Architecture, Construction and Design
**DESIGN FOR HERITAGE:
KNOWLEDGE AND INNOVATION**
Ph.D. Program
SSD: ICAR/14–ARCHITECTURAL AND URBAN DESIGN
Final Dissertation

3D printing for Architecture. Additive manufacturing applied to stereotomic design

by
Ilaria Cavaliere:

Referees:

Prof. Anthony Caradonna

Prof. Mauro Chiarella

Supervisors:

Prof. Giuseppe Fallacara

Prof. Nicola Parisi

Coordinator of Ph.D Program:

Prof. Carlo Moccia

Dottorato di Ricerca in “Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio”

Curriculum: Costruzione

XXXVI Ciclo (2020-2024)

Politecnico di Bari

Via Orabona 4

70126 Bari, Italia

Dottoranda: Ilaria Cavaliere

Matricola: 583234

Tutor: Prof. Giuseppe Fallacara

Co-Tutor: Prof. Nicola Parisi

Coordinatore del Dottorato: Prof. Carlo Moccia

In copertina: Stereotomic Tripod, progettato da Ilaria Cavaliere, Alessandro Angione e Dario Costantino

L'immagine alle pagine 18-19 è di Giuseppe Fallacara. Le immagini alle pagine 140-141 e 222-223 sono di Gaz Blanco.

Indice

1. Introduzione	8
1.1. Premessa	8
1.2. Struttura della tesi	11
1.3. Obiettivi della ricerca	12
1.4. Metodologia	14

PARTE PRIMA

2. Stereotomia: una panoramica sulla disciplina	18
2.1. Cenni storici sulla stereotomia	18
2.1.1. La stereotomia e le origini etimologiche del termine	18
2.1.2. Definizione e metodo	21
2.1.3. Le origini nel bacino del Mediterraneo	23
2.1.4. Lo sviluppo della disciplina stereotomica in Francia e in Italia	24
2.1.6. Declino e rinascita della stereotomia	28
2.1.7. La stereotomia nell'età contemporanea	29
2.2. Le ricerche della “scuola barese” di Architettura sulla disciplina stereotomica	33
2.2.1. L'identità della “scuola barese”	33
2.2.2. Le ricerche sulla stereotomia	34
2.3. Stereotomia 2.0: le nuove frontiere della disciplina stereotomica	38

PARTE SECONDA

3. Nuove tecnologie per la costruzione: l'additive manufacturing	44
3.1. La stampa 3D nell'era dell'industria 4.0	44

3.2. Alle origini della stampa 3D	45
3.3. Lo sviluppo della manifattura additiva in grande scala: gli antecedenti storici della stampa 3D vera e propria	49
4. La stampa 3D applicata all'architettura	64
4.1. La stampa 3D per l'edilizia	70
4.2. La stampa 3D per le infrastrutture	91
4.3. La stampa 3D per il design e le sperimentazioni formali	97
5. Additive manufacturing e stereotomia	118
5.1. Fabbricazione additiva e stereotomia	118
5.2. Stampa 3D e spazi voltati: analisi di casi studio	122
5.1.1. VULCAN	123
5.1.2. DE:STRESS Pavilion	127
5.1.3. Striatus Bridge e Phoenix	131
5.1.4. Hexastone	136
 PARTE TERZA	
6. Introduzione ai dimostratori	140
6.1. La fase di training iniziale	141
6.1.1. La realizzazione di due rocchi di una colonna di design	141
6.1.2. La realizzazione di una porzione di maquette del Ponte sul Basento di Sergio Musmeci	148
7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi	154
7.1. Stereotomic Green Vault	157
7.1.1. Introduzione	157

7.1.2. Il progetto	158
7.1.3. Possibili applicazioni architettoniche	163
7.1.4. Prototipazione: risoluzione di problemi e ottimizzazione della forma	165
7.1.5. La realizzazione di un modello di volta a botte	170
7.1.6. Test di rottura del prototipo	174
7.1.7. Considerazioni finali	175
7.2. Stereotomic Tripod	180
7.2.1. Introduzione	180
7.2.2. Il progetto	182
7.2.3. La prototipazione del modello in scala 1:5	189
7.2.4. La prototipazione del modello in scala reale	192
7.2.5. L'assemblaggio	197
7.2.6. Considerazioni finali	201
8. Stampa con un materiale innovativo che sfrutti gli scarti di cava	206
8.1. Da Vinci's Bridge	206
8.1.1. Introduzione	206
8.1.2. Il progetto	207
8.1.3. Prova di stampa di un modello in scala in argilla	215
8.1.4. Prova di stampa di alcuni conci in scala reale	216
8.1.5. Considerazioni finali e sviluppi futuri	218
PARTE QUARTA	
9. Conclusioni	222
Bibliografia e sitografia	226

Ringraziamenti

Desidero esprimere i miei più sinceri ringraziamenti a tutti coloro che hanno contribuito in modo significativo a questa ricerca.

Innanzitutto, desidero ringraziare il mio tutor, il prof. Giuseppe Fallacara, guida costante e preziosa. Senza la sua competenza e la sua disponibilità non sarei mai riuscita a raggiungere questo obiettivo.

Un ringraziamento va anche al mio co-tutor, il prof. Nicola Parisi, per il suo supporto soprattutto durante le fasi operative di questa ricerca.

Ringrazio anche tutti i docenti del Collegio di dottorato. Le discussioni stimolanti e le diverse prospettive da loro offerte hanno arricchito notevolmente il mio lavoro.

Voglio esprimere la mia gratitudine al gruppo di ricerca di cui faccio parte. In modo particolare ci tengo a ringraziare Angelo Vito Graziano e Alessandro Angione, colleghi e amici, con cui ho lavorato fianco a fianco nel corso di questi tre anni.

Vorrei anche ringraziare tutte le aziende con cui ho potuto collaborare e che mi hanno consentito di concretizzare la mia ricerca tramite la realizzazione dei prototipi: WASP, Francesco Brunetti e CNC Design, Tarricone Prefabbricati, Stilmarino e Mapei.

Voglio dedicare un sentito ringraziamento alla mia famiglia e ai miei amici per il loro costante sostegno morale e affettivo. In particolare ringrazio Dario Costantino, prezioso compagno di viaggio, senza cui quest'avventura non sarebbe stata la stessa.

Abstract

L'obiettivo di questa ricerca è investigare l'utilizzo della stampa 3D in architettura, con particolare riferimento alle strutture voltate di natura stereotomica. Ciò è avvenuto attraverso due fasi operative, una teorica e una pratica.

La prima è stata dedicata sia a un approfondimento sulla stereotomia sia allo studio dello sviluppo della stampa 3D, con un'analisi critica delle applicazioni di questa tecnologia nel settore delle costruzioni. È stata effettuata una classificazione dei principali esempi esistenti suddividendoli per categorie (edilizia, infrastrutture, design di grandi dimensioni, strutture stereotomiche), con lo scopo di comprendere gli attuali pro e contro dell'uso dell'*additive manufacturing* in campo architettonico.

Successivamente si sono sfruttate le nozioni acquisite per la progettazione e realizzazione di alcuni prototipi, finalizzati alla proposizione di nuove soluzioni formali e strutturali per gli spazi voltati stereotomici attraverso l'applicazione di vari tipi di stampa 3D.

The objective of this research is to investigate the use of 3D printing in architecture, referring in particular to stereotomic vaulted structures. Two operational phases were carried on: one theoretical and one practical.

The first one was dedicated both to an in-depth analysis of stereotomy and to the study of 3D printing development, with a critical analysis of the applications of this technology in the construction sector. A classification of the main existing examples was carried out by dividing them into categories (buildings, infrastructure, large scale design, stereotomic structures), with the aim of understanding the current pros and cons of the use of additive manufacturing in the architectural field.

Then the acquired knowledge was exploited for the design and creation of some prototypes, aimed at proposing new formal and structural solutions for stereotomic vaulted spaces through the application of various types of 3D printing.

Capitolo 1

Introduzione

1.1. Premessa

La presente ricerca si sviluppa all'interno del XXXVI ciclo del corso di dottorato in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio del dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD) del Politecnico di Bari.

Questo corso di dottorato mira ad approfondire la comprensione, la valorizzazione e la conservazione del patrimonio architettonico e paesaggistico, prendendo in considerazione anche una sua possibile attualizzazione¹. Il corso è suddiviso in tre curriculum:

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

Questa ricerca fa riferimento al curriculum *Costruzione* e si pone come obiettivo quello di indagare l'uso della stampa 3D per la realizzazione di spazi voltati stereotomici. Il patrimonio a cui essa è rivolta non è di natura concreta ma immateriale: si tratta della stereotomia, una disciplina antica utilizzata nella progettazione e realizzazione di strutture voltate per lo più in pietra.

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.

Un'attenzione particolare è stata rivolta alla pietra e a tutte le potenzialità che questo materiale – profondamente radicato nella tradizione architettonica pugliese – può esprimere grazie all'ausilio delle nuove tecnologie di modellazione e fabbricazione digitale e alla combinazione con materiali

¹ <https://www.poliba.it/it/didattica/dottorati-di-ricerca/conoscenza-e-innovazione-nel-progetto-il-patrimonio-design-heritage#>

innovativi, come la fibra di carbonio.

I vari studi condotti hanno consentito un vero e proprio aggiornamento della disciplina stereotomica, insieme alla definizione di una nuova estetica dell'architettura in pietra: il materiale lapideo non è più legato esclusivamente alla "massività" e alla pesantezza, ma può essere utilizzato per la realizzazione di strutture che evocino un'idea di leggerezza: volte traforate, pareti diafane, trame intrecciate, superfici sottili dalla geometria organica.

Tuttavia, se finora si è lavorato prevalentemente con una fabbricazione di tipo sottrattivo, cioè basata sull'asportazione di materiale dal blocco lapideo grezzo, la presente ricerca è focalizzata sulla fabbricazione additiva, la quale non solo presuppone l'utilizzo di altri tipi di materiale, ma offre anche nuove possibilità dal punto di vista formale.

Questo lavoro si pone in continuità con l'operazione di aggiornamento della stereotomia avviata presso il Politecnico di Bari, e porta avanti anche un tipo di logica basata sulla sostenibilità che viene già messa ampiamente in pratica nella scuola (la pietra è naturale, presenta una forte inerzia termica, è resistente e durevole, ecc.).

Come si vedrà più avanti, lo studio della stampa 3D porta anche a ragionare su questioni come la riduzione degli sprechi, la possibilità di usare materiali innovativi, la maggiore sicurezza sul lavoro, la possibilità di operare in maniera collaborativa anche a distanza attraverso lo scambio di file digitali. Tali tematiche si sposano perfettamente con gli obiettivi posti dall'accordo di Parigi² e dal Green Deal europeo. Quest'ultimo, come si legge sul sito della Commissione Europea, «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

² L'accordo di Parigi è un accordo firmato da 194 paesi dell'Unione Europea e che «mira a limitare il riscaldamento globale al di sotto di 2°C e a proseguire gli sforzi per circoscriverlo a 1,5°C al fine di evitare le conseguenze catastrofiche del cambiamento climatico». Informazioni più complete si possono trovare sul sito del Parlamento Europeo: <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20191115STO66603/1-ue-e-l-accordo-di-parigi-verso-la-neutralita-climatica>).

entro il 2050»³.

Il Green Deal comprende una serie di provvedimenti volti a ridurre le emissioni di CO₂ del 55% entro il 2030 e ad annullarle entro il 2050; tra le strategie proposte ve n'è una proprio di tipo industriale che ha lo scopo di incoraggiare la digitalizzazione e l'introduzione di tecnologie a basso impatto ambientale.

Il Green Deal europeo comprende anche il New European Bauhaus, un'iniziativa creativa e multidisciplinare che mira a un futuro sostenibile, inclusivo e «bello per i nostri occhi, le nostre menti e la nostra anima»⁴. Ursula von der Leyen, presidentessa della Commissione Europea, ha dichiarato: «Se lo European Green Deal ha un'anima, allora è il New European Bauhaus che ha portato a un'esplosione di creatività nell'Unione Europea»⁵.

Il New European Bauhaus promuove progetti artistici, culturali, architettonici e di design che siano non solo esteticamente accattivanti, ma anche significativi dal punto di vista della sostenibilità e dell'innovazione. Queste tematiche di interesse mondiale sono promosse in Europa anche all'interno del campo accademico e della ricerca. Lo European Innovation Council (EIC), per esempio, ha indetto bandi per finanziare ricerche all'interno della triade AEC (Architecture, Engineering and Construction) con particolare riferimento a tre temi: il *computational design*, la fabbricazione digitale e i materiali alternativi.

Il lavoro portato avanti durante questa ricerca di dottorato tocca proprio questi tre argomenti: oltre alla fabbricazione digitale – in questo caso la stampa 3D – si discuterà anche del processo di progettazione e ottimizzazione dei prototipi tramite varie pratiche di design computazionale e, in uno dei tre casi presentati, si parlerà anche di una malta innovativa che comprende una percentuale di scarti di lavorazione di cava.

³ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/industry-and-green-deal_it.

⁴ https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en?etrans=it&prefLang=it.

⁵ La frase originale è: «If the European Green Deal has a soul, then it is the New European Bauhaus which has led to an explosion of creativity across our Union». https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en?etrans=it&prefLang=it

1.2. Struttura della tesi

La presente tesi è divisa in quattro parti e nove capitoli. Dopo questo primo capitolo introduttivo si passa alla prima parte del volume, che comprende il secondo capitolo ed è incentrata su una panoramica della disciplina stereotomica dal punto di vista storico, a partire dalle origini etimologiche del termine fino agli sviluppi contemporanei. La stereotomia, infatti, rappresenta il fulcro architettonico della ricerca. All'interno di questo capitolo sono menzionati anche gli studi condotti a Bari, che hanno contribuito alla creazione dell'identità della scuola di architettura pugliese. La seconda parte, invece, si focalizza sulla stampa 3D. In particolare, il terzo capitolo è dedicato a un'analisi della tecnologia dal punto di vista sia storico sia tecnico, con un approfondimento sulle tipologie di fabbricazione additiva in grande scala più diffuse. Vengono anche individuati alcuni antecedenti storici della stampa 3D architettonica, osservando la somiglianza dei principi adottati nei brevetti presi in esame con le attuali tecniche *additive manufacturing*.

Nel quarto capitolo, invece, si analizza lo stato dell'arte dell'uso della stampa 3D nel settore delle costruzioni, proponendo una classificazione delle più significative opere architettoniche che ne abbiano previsto l'uso. Nello specifico, si è operata una suddivisione in opere di edilizia, opere infrastrutturali e opere di design in grande scala. Da questa catalogazione sono state volutamente escluse le opere stereotomiche, alle quali è

Fig. 1. Logo del New European Bauhaus (© Unione Europea).



dedicato il quinto capitolo in maniera esclusiva. Poiché esistono ancora pochi esempi di *additive manufacturing* applicato alla stereotomia, è stato possibile analizzare singolarmente e in maniera più approfondita i casi studio selezionati, evidenziandone punti di forza e criticità.

La terza parte è dedicata alla descrizione critica di alcune esperienze che hanno visto coinvolta la scrivente e che si sono concretizzate in prototipi di strutture stereotomiche stampate in 3D, le quali rappresentano dei veri e propri dimostratori. Nello specifico, il sesto capitolo consiste in un'introduzione ai prototipi, i quali sono suddivisi in due categorie e vengono analizzati in maniera dettagliata nel settimo e nell'ottavo capitolo. Il settimo capitolo è, quindi, dedicato alla prima categoria – quella delle volte cassettonate diafane – e comprende due dimostratori: la Stereotomic Green Vault e lo Stereotomic Tripod. L'ottavo capitolo, invece, riguarda la realizzazione di strutture attraverso la stampa per *layer* non paralleli e include il da Vinci's Bridge.

Tutti questi modelli vengono analizzati nel dettaglio: si parte dalla descrizione della parte progettuale, commentandone le varie fasi, per poi passare alla realizzazione, con una disamina dei vari problemi sopraggiunti durante la fabbricazione e la loro risoluzione, per poi concludere con delle considerazioni finali tratte dall'esperienza.

Infine la quarta parte, che comprende il nono capitolo, contiene le riflessioni critiche circa l'uso della stampa 3D per la stereotomia e le conclusioni in merito al lavoro svolto, con un'analisi di vantaggi e svantaggi e le prospettive future.

1.3. Obiettivi della ricerca

La ricerca in oggetto presenta i seguenti obiettivi:

- 1) Studiare in maniera generale gli sviluppi storico-architettonici della stereotomia.

Poiché la disciplina stereotomica rappresenta il focus architettonico principale di questa ricerca, è necessario comprenderne l'evoluzione storica e avere consapevolezza dei suoi principi fondamentali, valutandone anche la trasformazione in età contemporanea in seguito all'introduzione delle tecnologie digitali a supporto sia della progettazione che della

fabbricazione. Senza questa base conoscitiva sarebbe impossibile avanzare in autonomia ipotesi su possibili ulteriori progressi della disciplina.

- 2) Studiare la tecnologia di stampa 3D nelle sue varie applicazioni e prospettive.

Siccome l'approfondimento tecnologico di questa tesi riguarda l'*additive manufacturing*, è necessario comprenderne i principi-base, in modo da avere consapevolezza circa le possibili applicazioni e i suoi limiti. Questo comprende anche una panoramica sulle varie tecnologie di stampa 3D e un approfondimento su quelle più diffuse in ambito costruttivo.

- 3) Analizzare le modalità di utilizzo della stampa 3D in ambito architettonico e costruttivo, valutandone la diffusione, i campi di applicazione ed effettuando una catalogazione degli esempi più significativi (stato dell'arte), con un'attenzione particolare alle strutture definibili stereotomiche.

Questo obiettivo consiste in un'interpolazione delle conoscenze ottenute attraverso i due precedenti ed è imprescindibile per comprendere come la tecnologia in questione possa influenzare il settore della costruzione. Un approfondimento sullo stato dell'arte è doveroso per esaminare le possibilità strutturali e formali e le tipologie di materiali utilizzabili con la fabbricazione additiva.

- 4) Condurre personalmente esperienze che riguardino la progettazione di strutture voltate stereotomiche.

Sulla base delle conoscenze teoriche acquisite è possibile avanzare delle ipotesi per nuove strutture stereotomiche stampate in 3D che permettano di riflettere su nuove prospettive e nuove possibilità. In questo caso si è ragionato sia su questioni formali sia su materiali innovativi. Per ciascuna esperienza verrà descritta tutta la fase di design, modellazione e ottimizzazione, menzionando anche gli strumenti software utilizzati.

- 5) Realizzazione delle strutture precedentemente progettate sotto forma di prototipi.

Dopo la formulazione di ipotesi teoriche è necessario passare a una fase operativa per effettuare un bilancio effettivo dei pro e dei contro riscontrati. Per ciascuna esperienza saranno descritte le varie fasi di produzione, dalla fabbricazione dei singoli elementi costruttivi fino al loro assemblaggio.

6) Analisi e considerazioni finali.

Gli esiti delle esperienze saranno esaminati e commentati, sottolineando i problemi affrontati e i vantaggi procurati dalla stampa 3D rispetto alle tecniche di fabbricazione tradizionali.

1.4. Metodologia

Come si è già avuto modo di accennare, questa ricerca ha previsto due fasi fondamentali: una prima fase di natura teorica – che comprende le ricerche bibliografiche sullo stato dell'arte – e una seconda fase di natura pratica, che ha previsto delle vere e proprie esperienze di progettazione e costruzione, secondo l'approccio del *learning by doing* già consolidato nei paesi anglosassoni.

Durante il percorso di ricerca del dottorato la scrivente ha avuto modo sia di utilizzare strumenti software di modellazione parametrica per l'elaborazione dei progetti sia di interfacciarsi direttamente con la tecnologia di fabbricazione. Ciò è avvenuto attraverso un *training* iniziale con cui ha ottenuto le competenze di base di stampa 3D e ha imparato a utilizzare la Delta WASP 3 mt, una stampante di grandi dimensioni presente presso il FabLab Poliba⁶. Per questa ragione ha potuto dedicarsi in maniera diretta alla realizzazione dei prototipi che verranno descritti. Laddove non abbia potuto utilizzare personalmente i macchinari, ha comunque contribuito all'ottimizzazione dei modelli sulla base delle conoscenze acquisite.

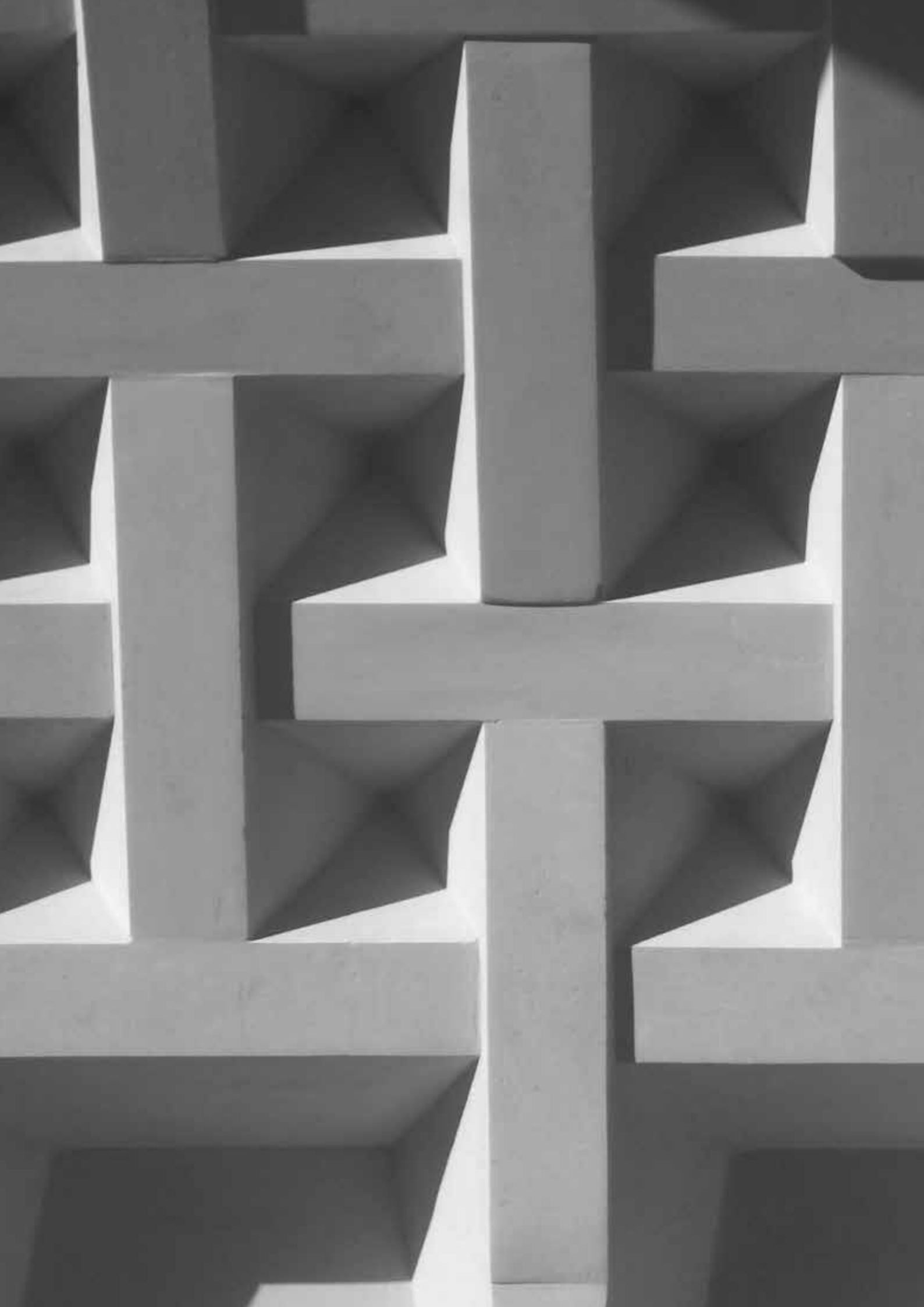
Per ciascuna sperimentazione sarà seguito il seguente iter:

1) l'esperienza è collocata all'interno di una macrocategoria a cui il

⁶ Il FabLab Poliba è il laboratorio di fabbricazione digitale del Politecnico di Bari e si trova a Bitonto (BA). Esso è dotato di numerosi macchinari di fabbricazione digitale tra cui svariate stampanti 3D di piccole dimensioni, le stampanti di grandi dimensioni Delta WASP 3 mt e la BigRep, la stampante Delta WASP 40 100 clay, una fresa, un fresa 3D, una macchina per il taglio laser, ecc.

prototipo è ascrivibile;

- 2) vengono individuate tutte le condizioni al contorno (le modalità di modellazione, i materiali da utilizzare, i macchinari a disposizione, ecc.);
- 3) il prototipo viene modellato e ottimizzato per la realizzazione;
- 4) il prototipo viene realizzato;
- 5) l'esito finale è criticamente analizzato e paragonato ad altre sperimentazioni condotte da altri ricercatori;
- 6) vengono presentate le conclusioni e le ipotesi per una possibile evoluzione futura della ricerca.



PARTE PRIMA



Capitolo 2

Stereotomia: una panoramica sulla disciplina

2.1. Cenni storici sulla stereotomia

Il presente capitolo si propone di presentare una sintesi dell'evoluzione storica della disciplina stereotomica, che è alla base di questa tesi di dottorato. Le informazioni riportate sono tratte prevalentemente dal lavoro di ricerca svolto dal prof. Giuseppe Fallacara nel corso degli anni. Tale percorso di ricerca è iniziato con la sua tesi di dottorato (2004), intitolata *Il paradigma stereotomico dell'arte di costruire. Dalla natura sincretica della modellazione digitale alla progettazione/costruzione di elementi architettonici in pietra da taglio*, e si è protratto fino a oggi, con numerose altre pubblicazioni nazionali e internazionali, tra cui *Verso una progettazione stereotomica* (2007), *Stereotomia Ri-composta. L'evoluzione di una disciplina che insegna a costruire lo spazio* (2012), *Architectural Stone Elements. Research, design and fabrication* (2016), *Stereotomy 2.0 and Digital Construction Tools* (2018), *Stereotomy 2.0: informing the future of Digital Stereotomy* (issue 3 del volume 20 del Nexus Network Journal, curato insieme a Maurizio Barberio nel 2018) e *My ArchiSign. Architettura e Design in Pietra. Pensieri, opere e visioni* (2022).

2.1.1. La stereotomia e l'origine etimologica del termine

La stereotomia è una disciplina sviluppatasi in maniera consistente a partire dal XVI-XVII secolo – anche se ne esistono alcune tracce già a partire dall'età medievale – ed è conosciuta anche come “l'arte del taglio dei solidi”. Essa consiste nell'applicazione delle regole della geometria proiettiva per la progettazione di strutture voltate, ottimizzandone gli elementi costruttivi in modo da ottenere sia una buona resistenza strutturale, sia un alto valore estetico⁷.

Il termine “stereotomia” probabilmente deriva dall'unione delle due parole greche στερεός (stereós), ossia “solido”, e τομία (tomía), cioè “taglio”⁸. La parola “solido” può avere due accezioni differenti: può essere un aggettivo e riguardare la materia in sé – avente una sua consistenza –

⁷ Fallacara, G., Barberio, M., *An Unfinished Manifesto for Stereotomy 2.0*, in *Nexus Network Journal*, n. 20, issue 3, 2018, pp. 519-543.

⁸ Fallacara, G., *Verso una progettazione stereotomica. Nozioni di Stereotomia, Stereotomia digitale e trasformazioni topologiche: ragionamenti intorno alla costruzione della forma*, Roma, Aracne editrice, 2007.

oppure può essere usato come sostantivo e indicare elementi geometrici tridimensionali – come i solidi pitagorici e platonici. Tali elementi tridimensionali possono essere ricavati dalla materia proprio attraverso un’operazione di taglio. Nel caso di una disciplina tecnica come la stereotomia, con “materia” si intende il materiale da costruzione – come la pietra o il legno –, da cui si ricavano i blocchi con cui un sistema voltato è apparecchiato e i quali, per poter essere realizzati in maniera corretta, hanno necessità di essere rappresentati con rigore, per l’appunto attraverso complesse regole proiettive.

Il termine “stereotomia” è individuabile per la prima volta nel 1644 nel *Examen des oeuvres de Sr. Desargues*, trattato di Jaques Curabelle all’interno del quale l’autore analizza i testi di Desargues sulla geometria applicata al taglio delle pietre, criticandoli aspramente.

Jacques Curabelle, un noto maestro “apparecchiatore”, aveva, infatti, dedicato un’invettiva a Girard Desargues – matematico che aveva tentato di individuare delle regole universali per risolvere i problemi geometrici di tipo proiettivo – poiché riteneva che tali norme fossero poco legate alla pratica della costruzione. Desargues, dal canto suo, difendeva l’esattezza dei ragionamenti geometrici piuttosto che i criteri di fattibilità.

La disputa tra Desargues e Curabelle è passata alla storia come uno degli scontri più accesi sulla difesa ed esattezza dei metodi teorici e pratici applicati alla costruzione. Curabelle e Desargues rappresentavano in realtà due categorie sociali che ambivano al controllo dell’esercizio professionale: gli apparecchiatori – detentori della pratica, di cui faceva parte il primo – e i geometri – detentori della teoria, cui appartiene il secondo⁹.

La parola “stereotomia” presenta la stessa radice etimologica del vocabolo “stereoma”, che indica il luogo delle stelle fisse. In particolare, si fa riferimento alla rappresentazione cristiana del mondo di Cosma Indicopleuste, il quale, nella sua *Topografia Cristiana*, descriveva il creato come un baule di forma parallelepipedica, sovrastato da un *tabernaculum*, ossia una struttura intelaiata chiusa in sommità da una volta a botte, nascosta agli occhi dell’uomo dallo stereoma, ovvero dal firmamento – appunto, il luogo delle stelle fisse (fig. 2). Tale rappresentazione è a sua volta derivante dalla configurazione del tabernacolo costruito da Mosè in qualità di santuario trasportabile, descritto all’interno della Bibbia, e

⁹ Fallacara, G., *op. cit.*, 2007.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte prima

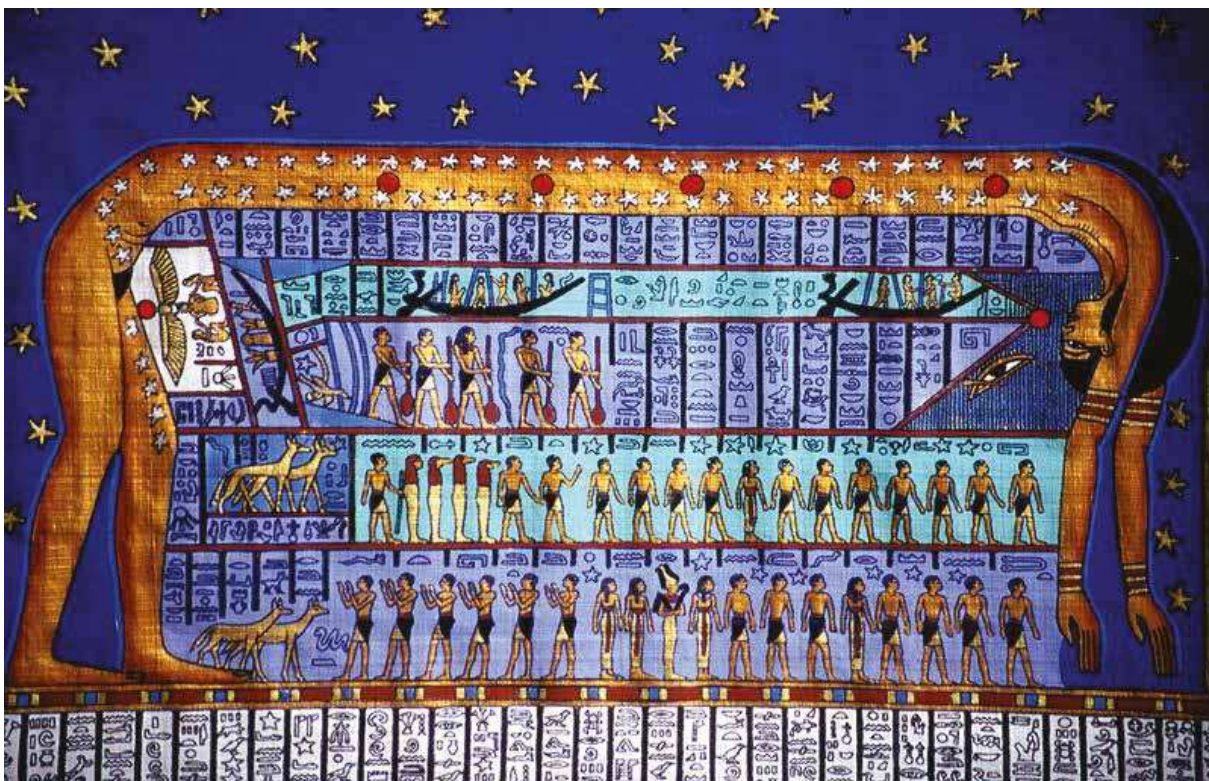
Cap. 2. Stereotomia: una panoramica sulla disciplina

richiama anche la più antica immagine della dea Nut, divinità egizia del cielo, rappresentata piegata nell'atto di ricoprire la terra e con il ventre cosparso di stelle (fig. 3).

Fig. 2. Rappresentazione del Mondo Tabernacolo. Immagine tratta da *Topographia christiana* di Cosma Indicopleuste (901-1000 d.C.), manoscritto conservato presso la Biblioteca Medicea Laurenziana, Firenze.



Fig. 3. Rappresentazione della dea Nut, col ventre coperto di stelle e piegata per formare il cielo (© World History Archive / Cordon Press).



Le parole “stereotomia” e “stereoma” sono entrambe riconducibili al concetto di spazio voltato: la stereotomia è legata alle volte concrete, mentre lo stereoma fa riferimento alla volta celeste.

Non è un caso che le volte a botte cassettonate delle navate centrali delle chiese riprendano proprio la rappresentazione del mondo-tabernacolo, in cui le stelle erano disposte in maniera ordinata sullo stereoma, intorno alla figura del Cristo. I cassettoni reinterpretano proprio la scansione geometrica delle stelle sulla superficie della volta celeste¹⁰.

Nonostante il vocabolo “stereotomia” sia stato introdotto da Curabelle, la disciplina cui fa riferimento era già nota da secoli come *art du trait géométrique*, definita da Philibert de l'Orme nel suo *Le Premier Tome de l'Architecture* del 1567. È possibile che de l'Orme abbia avuto interesse a “normare” in maniera puntuale tale disciplina perché essa veniva tramandata oralmente¹¹.

2.1.2. Definizione e metodo

Si è spiegato che la stereotomia è una disciplina che riguarda la rappresentazione esatta dei conci costituenti una struttura complessa in pietra o legno – una volta, una scala, una carpenteria, ecc. –, al fine di renderne possibile il taglio preciso in fase di realizzazione. Ciò avviene tramite l'applicazione delle regole della geometria proiettiva, che consentono di ottenere le superfici di involuppo dei solidi in questione, ossia le superfici delle singole facce disposte sul piano. Tali regole sono precisamente codificate e ripetibili. La disciplina stereotomica, dunque, si concretizza nell'apparecchiatura di un sistema voltato ed è strettamente connessa alla realizzazione di organismi architettonici composti da elementi discreti che non siano vincolati tra loro se non attraverso una specifica conformazione dei giunti. Ciò comporta una serie di considerazioni di tipo statico e meccanico in fase di progettazione.

Uno spazio voltato non è necessariamente stereotomico: perché lo sia devono essere presenti tre invarianti, che sono:

¹⁰ Fallacara, G., *Stereotomia e rappresentazione del mondo*, in Fallacara, G., Minenna, V., *Stereotomic Design. Catalogo della mostra omonima per Inside Marmomacc & Abitare il Tempo Veronafiere, Verona 2014*, Maglie, Edizioni Gioffreda, 2014, pp. 17-30.

¹¹ Fallacara, G., op cit, 2007.

- 1) l'invariante prefigurativo, che riguarda l'apparecchiatura: il sistema architettonico deve essere opportunamente suddiviso in elementi discreti;
- 2) l'invariante tecnico-geometrico, che riguarda la definizione geometrica precisa sia dell'intero organismo architettonico sia dei singoli concetti che lo compongono;

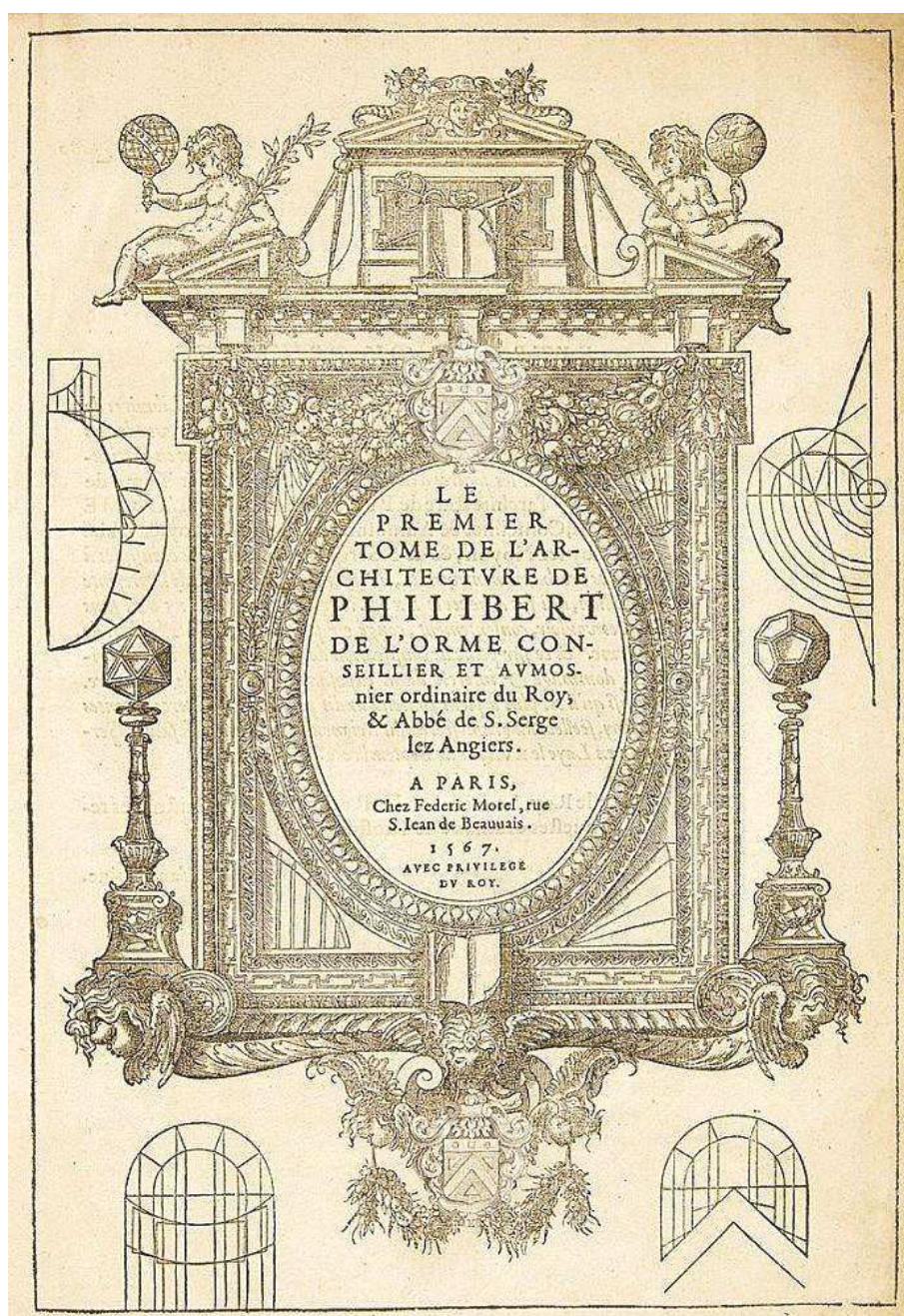


Fig. 4. Frontespizio
de *Le Premier Tome de
l'Architecture* di Philibert
de l'Orme.

- 3) l'invariante statico, che riguarda la capacità di assicurare l'equilibrio meccanico del sistema architettonico totalmente compresso e giuntato, secondo la meccanica dei corpi rigidi.

Se questi tre parametri sono presenti contemporaneamente, il sistema può dirsi stereotomico, ma al venir meno anche di uno solo, esso non rientra più in questo tipo di categoria¹².

Una volta in mattoni, per esempio, non può dirsi stereotomica perché, pur presentando gli invarianti prefigurativo e statico, manca di quello tecnico-geometrico: l'organismo architettonico presenta un'apparecchiatura, ma non è opportunamente suddiviso secondo una configurazione ottimale, essendo composto di elementi standardizzati che possono rimanere in equilibrio solo con l'ausilio della malta.

2.1.3. Le origini nel bacino del Mediterraneo

Nonostante la Francia sia culla della stereotomia, esempi di architetture stereotomiche sono diffusi in un'area geografica molto ampia avente come centro il Bacino del Mediterraneo e alcune di esse risalgono addirittura all'età Ellenistica. Secondo una teoria formulata da Eugène Viollet-le-Duc nel XIX secolo e considerata tutt'oggi valida, la disciplina stereotomica sarebbe stata importata nell'Europa Occidentale dall'Europa Orientale ad opera dei crociati¹³. Sistemi voltati stereotomici sono, infatti, presenti nelle architetture medievali mamelucche: nelle mura fatimidi del Cairo, infatti, se ne possono individuare diversi. Tra essi i più antichi si trovano all'interno della porta di Bab el Nasr (1087-1092) e consistono in due volte elicoidali che coprono delle scale a chiocciola¹⁴.

¹² 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 Mediterraneo*, XVI ciclo (2000-2003), tutor: prof. Claudio D'Amato Guerrieri.

¹³ Galletti, S., *Stereotomy and the Mediterranean: Notes Toward an Architectural History*, in *Mediterranean International Journal on the Transfer of Knowledge*, vol. 2, pp. 73-120.

¹⁴ Salcedo-Galera, M., Garcia-Bano, R., *Stonecutting and Early Stereotomy in the Fatimid Walls of Cairo*, in *Nexus Network Journal*, vol. 24, pp. 657-672, 2022.

Questo tipo di struttura viene riproposto in Sicilia qualche secolo più tardi: si tratta della scala che si trova nella torre est del castello Maniace di Siracusa, risalente alla prima metà del XIII secolo. Questo modello di volta viene denominato, in Francia, *vis de Saint Gilles*, come una cittadina del sud del paese, nel cui campanile è stata costruita una scala analoga¹⁵.

Sempre in Sicilia esistono altri esempi architettonici che testimoniano l'ispirazione alle opere arabe, come le Muqarnas della Cappella Palatina della Zisa a Palermo – queste ultime chiaramente ispirate alle più note Muqarnas islamiche¹⁶.

2.1.4. Lo sviluppo della disciplina stereotomica in Francia e in Italia

Come già spiegato, la stereotomia raggiunge il suo apice in Francia nel XVI e XVII secolo, quando viene a tutti gli effetti codificata, nonostante esistano esempi più antichi di architetture stereotomiche nel mondo islamico. Opere di trattatistica vengono prodotte anche in altri paesi europei ma non raggiungono quelle francesi né per quantità né per qualità. Di seguito si menzionano le opere di trattatistica francese ritenute più significative per comprendere lo sviluppo storico della stereotomia. Si è detto che a Philibert de l'Orme è attribuita la definizione e la codifica dell'*art du trait géométrique*, all'interno dei libri terzo e quarto de *Le Premier*

¹⁵ Bares, M. M., *La Vis de Saint-Gilles del castello Maniace di Siracusa: un'audace sperimentazione di stereotomia*, in *LEXICON: Storie e Architettura in Sicilia*, n. 4, 2007, pp. 15-23.

¹⁶ Galletti, S., op. cit.



Fig. 5. La *Vis de Saint Gilles* del Castello Maniace di Siracusa (© Maria Mercedes Bares).

Tome de l'Architecture (1567). La disciplina viene poi sviluppata e aggiornata sino alla metà del XVIII secolo.

I *traits* di cui parla de l'Orme consistono in rappresentazioni grafiche bidimensionali – generalmente in scala – dei vari elementi costituenti l'organismo architettonico, ottenute tramite le tecniche di geometria proiettiva, utili agli scalpellini per la realizzazione precisa di ogni singolo blocco¹⁷. A de l'Orme si deve il progetto della *trompe* del castello di Anet, realizzata proprio grazie alla tecnica dei *traits* (fig. 6). Questo esempio di virtuosismo architettonico oggi non esiste più, tuttavia ci sono ancora le *trompe* dell'hôtel de Builloud a Lione, che, seppur di geometria più semplice rispetto all'esempio più celebre, sono sempre attribuite a de l'Orme (fig. 7)¹⁸.

¹⁷ Trevisan, C., *Le proporzioni nascoste nel trait della trompe di Anet*, in *Disegnare idee immagini*, vol. 16, 1999, pp. 59-66.

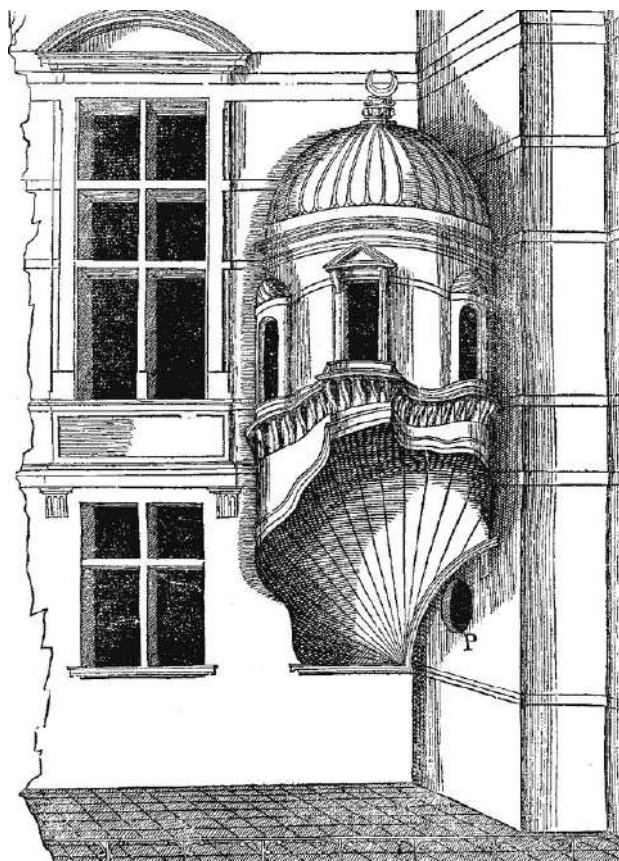
¹⁸ Trevisan, C., *Per la Storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Roma, Aracne Editrice, 2011.

Fig. 6 (a sinistra).

La *trompe* del castello di Anet in un disegno di de l'Orme.

Fig. 7 (a destra).

Fotografia della *trompe* dell'hôtel de Builloud a Lione (© Jean-Michel Mathonière, D.R.).



La codifica della geometria proiettiva, invece, è introdotta da Desargues dapprima nel 1639, nel *Brouillon project d'une atteinte aux evenemens des rencontres du Cone avec un Plan*—in cui viene spiegata la teoria della geometria descrittiva applicata alle sezioni coniche—, mentre nel 1649, col *Brouillon Project d'exemple d'une maniere universelle du S.G.D.L. [Sieur Girard Desargues Lyonnais] touchant la pratique du trait à preuve pour la coupe des pierres en l'Architecture*, egli propone un metodo per il taglio della pietra che sfrutti le regole della geometria proiettiva per contrapporsi ai metodi approssimativi degli operai.

Le opere di Desargues, pur essendo rivoluzionarie per l'evoluzione della geometria, presentano un linguaggio complesso, non apprezzato dagli scalpellini: da qui la disputa con Curabelle.

Il primo libro interamente dedicato alla stereotomia è *Le secret d'architecture* di Mathurin Jousse del 1642: nel titolo è esplicitata la natura criptica di questa disciplina tanto complessa.

Seguono altre numerose opere riguardanti la stereotomia, sia incentrate sugli aspetti teorico-matematici sia sugli aspetti pratici, ma l'opera più monumentale riguardante l'argomento è *La theorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois*, pubblicata nel 1737 da Amédée-François Frézier, suddivisa in tre volumi e contenente tutto il sapere inerente alla disciplina stereotomica, insieme a una serie di soluzioni pratiche fino ad allora inedite. Egli presenta una tassonomia dei sistemi voltati analizzati nella loro costituzione geometrica, con poco spazio a considerazioni di tipo statico: comincia a crearsi una separazione tra le conoscenze molto avanzate dal punto di vista geometrico e la capacità di razionalizzare le proposte formali da un punto di vista meccanico.

Infine, la definizione analitica della stereotomia arriva nel 1798 per opera di Gaspard Monge all'interno del suo trattato *Géometrie descriptive. Leçons données aux École Normales l'an 3 de la République, Paris, an VII*. Egli teorizza per la prima volta la geometria descrittiva, con cui si possono rappresentare sul piano oggetti tridimensionali. Con Monge viene introdotta una nuova concezione della disciplina della rappresentazione, che non è più strettamente legata alla costruzione, ma assume una sua autonomia¹⁹.

La cultura della stereotomia ha portato, in Francia, alla realizzazione di capolavori assoluti dell'architettura come la volta dell'atrio dell'Hôtel de Ville ad Arles (fig. 8), progettata da Jules Hardouin-Mansart e completata

¹⁹ Fallacara, G., *op. cit.*, 2007.

nel 1676. Questo spazio voltato risulta particolarmente ardito per via del rapporto tra altezza della volta e luce coperta, tale da renderla quasi piana, e per la geometria complessa che la caratterizza, composta da più porzioni di volta²⁰.

La volta dell'atrio dell'Hôtel de Ville è stata studiata attraverso un rilievo effettuato tramite laser scanner durante un laboratorio di laurea seguito dal prof. Fallacara nell'anno accademico 2007-2008²¹.

Differentemente dalla Francia, in Italia non si sviluppa una trattazione sistematica della disciplina stereotomica, la quale risulta sostanzialmente assente in letteratura. Le uniche eccezioni sono rappresentate da Guarino Guarini e Bernardo Vittone.

Guarini approfondisce la stereotomia fondamentalmente nei suoi scritti, poiché, in realtà, le opere da lui progettate e realizzate sono in mattoni e

²⁰ Fallacara, G., Resta, F., Spallucci, N., Tamborero, L., *The Vault of the Hôtel de Ville in Arles*, in *Nexus Network Journal*, vol. 13, n. 3, 2011, pp. 599-629.

²¹ Mattiace, M., Pellicciari, C., Procino, G., Resta, F., Spallucci, N., Traversa, M. L., *La volta dell'Hotel de Ville di Arles*, tesi di laurea, a. a. 2007-2008, Politecnico di Bari, relatore prof. G. Fallacara.

Fig. 8. La volta piana dell'atrio dell'Hôtel de Ville ad Arles
(© Lorenzo Taccioli).



non possono considerarsi di natura stereotomica, nonostante esse, nella loro geometria globale, presentino soluzioni formali ottenute grazie alle tecniche proiettive proprie delle architetture francesi.

Il frate teatino è probabilmente entrato in contatto con questa disciplina tra il 1662 e il 1666, durante una sua missione a Parigi e successivamente l'ha approfonditamente analizzata nelle sue opere.

La prima fonte in cui Guarini menziona la sua conoscenza delle tecniche di geometria proiettiva sviluppate in Francia è il *Tractatus XXXII: De Superficieibus corporum in planum redigendis*, presente nell'*Euclides adauctus et methodicus mathematicae universalis*: egli, infatti, parla di un metodo per disegnare sul piano tutte le geometrie delle facce dei conci di una fabbrica, in modo che questi possano essere realizzati tagliando la pietra.

Tuttavia l'opera più vasta di Guarini sulla stereotomia è il *Trattato IV* dell'*Architettura Civile*, intitolato *Dell'ortografia gettata*.

L'*Architettura Civile* viene curata redazionalmente da Bernardo Vittone e pubblicata postuma nel 1737.

Anche nel caso di Vittone, più che di architettura stereotomica vera e propria, si può parlare di forme architettoniche che affondano le radici nella tradizione francese, ma che sono comunque realizzate in mattoni.

A partire dal 1750 lo studio della stereotomia e la sua applicazione iniziano a regredire progressivamente, con una sempre maggiore concentrazione sugli aspetti teorico-scientifici della geometria descrittiva piuttosto che sulla sua applicazione per la realizzazione di opere stereotomiche^{22, 23}.

2.1.6. Declino e rinascita della stereotomia

Con l'avvento dell'Illuminismo, la disciplina stereotomica inizia a essere considerata in maniera differente, perché ritenuta poco pratica e non rispondente alle necessità dell'epoca. Cominciano, inoltre, a diffondersi nuovi materiali da costruzione, come il ferro e la ghisa, i quali conducono a

²² Fallacara, G., *op cit.*, 2007.

²³ 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 Mediterraneo*, XVI ciclo (2000-2003), tutor: prof. Claudio D'Amato Guerrieri.

un importante cambiamento dell'architettura, secondo una nuova estetica basata sulla leggerezza piuttosto che sulla "massività".

Nel XIX secolo la stereotomia diviene uno strumento didattico utile a formare gli studenti dell'École des Beaux-Arts e dell'École Polytechnique²⁴.

2.1.7. *La stereotomia nell'età contemporanea*

Dopo la lunga fase di abbandono della stereotomia iniziata con l'avvento dell'Illuminismo e della Prima Rivoluzione Industriale, a partire dalla seconda metà del Novecento rinasce l'interesse nei confronti della disciplina sia dal punto di vista teorico sia storico.

Si ricomincia a investigare la materia a partire dal secondo Dopoguerra: nel 1951 René Taton discute una tesi di dottorato incentrata su Monge e Desargues.

Seguono gli studi di Jean-Marie Pérouse de Montclos, che nel 1964 dirige la catalogazione di tutti i monumenti in Francia, mettendo a punto un metodo specifico per questa operazione e che, nel 1982, pubblica *L'Architecture à la française, du milieu du XV^e à la fin du XVIII^e siècle*, in cui la stereotomia viene individuata come parte integrante dell'identità francese.

Un altro contributo importante è quello di Jacques Heyman, che, a partire dal 1966, pubblica una serie di scritti di ingegneria civile focalizzati sulla costruzione in muratura, soprattutto degli spazi voltati. Egli analizza la stereotomia da un punto di vista matematico-meccanico e le sue opere sono alla base del filone di ricerca strutturale sulla disciplina che oggi viene portato avanti da parte di una serie di università e associazioni – per esempio l'associazione Edoardo Benvenuto o il gruppo Masonry Research dell'M.I.T. coordinato da John A. Ochsendorf.

Seguono numerosi altri contributi teorici, si pensi agli scritti di Werner Müller, Alberto Perez-Gomez, Philippe Potié, ecc.

La svolta si ha alla fine del Novecento, quando si inizia a ipotizzare un rinnovamento della disciplina stereotomica grazie all'apporto dei software di *Computer Aided Design* (CAD) e delle macchine a controllo numerico (*Computer Aided Manufacturing*, CAM). Nel 1993, infatti, Mark Cameron Burry – che nel 1992 ha fondato il Construction Committee of Sagrada

²⁴ Fallacara, G., Per una storia della stereotomia contemporanea: 1951-2011, in Fallacara, G., *Stereotomia Ri-Composta*, Roma, ARACNE Editrice, 2012, pp. 23-70.

Família per proseguire la ricostruzione della celebre basilica di Antoni Gaudí secondo il progetto originale – pubblica il libro *Templo Expiatorio de la Sagrada Familia*, cui seguono altri scritti sull'argomento, all'interno dei quali egli sottolinea l'importanza di un possibile apporto delle tecnologie digitali per la costruzione di elementi artistici o architettonici di pregio. Egli parla anche delle possibilità che la modellazione CAD e la fabbricazione CAM potrebbero portare alla lavorazione della pietra, soprattutto in caso di geometrie complesse.

Questa nuova direzione di indagine viene presto accolta da vari gruppi di ricerca in tutto il mondo, partendo dagli Stati Uniti per poi diffondersi anche in Europa.

Bernard Cache è una figura di spicco per quanto riguarda l'approfondimento dell'uso della modellazione digitale e delle macchine a controllo numerico per “plasmare” la materia. Egli fonda nel 1996 la Objectile Company insieme a Patrick Beauce e Jean-Louis Jammot in collaborazione con la software house MISSLER; successivamente diviene docente presso la Faculty of Architecture, Landscape and Design (AL&D) dell'Università di Toronto e Direttore della Sezione Cibernetica dell'ESARQ (Barcellona) Escuela de Arquitectura – Universidad Internacional de Catalunya. Cache produce numerose pubblicazioni inerenti al rapporto tra geometria, modellazione e costruzione assistita digitale²⁵.

Un punto di riferimento in Italia, invece, è Camillo Trevisan, docente di disegno presso l'università IUAV di Venezia, il quale, nel 1997, si dedica a uno studio circa il rapporto tra stereotomia e modellazione 3D, producendo il software *Trompe*²⁶, per la generazione di modelli tridimensionali di varie *trompe* coniche e dei relativi sviluppi bidimensionali.

Ricerche più improntate agli aspetti strutturali della muratura sono, invece, condotte da John Ochsendorf, docente presso il Massachusetts Institute of Technology²⁷.

Tra i centri di ricerca in cui lo studio della stereotomia viene particolarmente approfondito spicca proprio la facoltà di Architettura del Politecnico di Bari, dove il prof. Claudio D'Amato Guerrieri, suo fondatore, avvia uno

²⁵ Ibid.

²⁶ <https://www.camillotrevisan.it/trompe.htm>

²⁷ Fallacara, G., op. cit., 2012.

specifico filone di indagine a essa dedicato – come si vedrà più nel dettaglio nel prossimo paragrafo.

Progressivamente nel corso degli anni, anche grazie alla diffusione delle tecnologie CAD/CAM e di software di modellazione parametrica sempre più performanti, la ricerca sulla stereotomia passa da un focus puramente storico-teorico a uno pratico. Infatti i laboratori di varie sedi universitarie si sono dedicati alla sperimentazione attraverso un approccio *learning by doing*, cioè producendo prototipi di volte organiche e *shell* di natura stereotomica. Tra gli accademici che si occupano dell'innovazione della stereotomia si possono menzionare Brandon Clifford – fondatore del laboratorio di ricerca Matter Design –, Philippe Block – fondatore del Block Research Group –, Christian R. Pongratz – docente presso il New York Institute of Technology –, Pedro Azambuja Varela – docente presso l'Università di Porto che si è impegnato in un'operazione di censimento e catalogazione di tutte le architetture stereotomiche²⁸ – e Giuseppe Fallacara – docente presso il dipartimento di Architettura, Costruzione e Design del Politecnico di Bari –, impegnato da più di vent'anni nell'esplorazione delle nuove possibilità offerte dal materiale lapideo e dalla “stereotomia 2.0”.

La maggior parte degli attuali esempi di ricerca si basano sull'uso della modellazione parametrica e della fabbricazione digitale nella realizzazione di spazi voltati dalla geometria complessa.

In generale, però, le tipologie di fabbricazione digitale adottate sono per lo più di tipo sottrattivo, essendo in gran parte impiegati materiali naturali (pietra e legno).

Tuttavia sta aumentando l'interesse nei confronti delle tecnologie di fabbricazione additiva, che permettono di esplorare nuove frontiere nel settore costruttivo sia per quanto riguarda le possibilità formali sia per l'uso di materiali innovativi.

L'intento principale del percorso di ricerca descritto in questa tesi è

²⁸ Il lavoro di catalogazione di Pedro Azambuja Varela nasce dalla sua tesi di dottorato, intitolata *Reconstrução de uma Estereotomia – para uma abordagem estereotómica multi-semântica* (Ricostruzione di una Stereotomia – per un approccio stereotomico multi-semantico), discussa presso l'Università di Porto nel 2020. La tesi si prefiggeva come obiettivo quello di proporre un nuovo sistema di classificazione delle architetture stereotomiche, tenendo conto anche dei progressi della disciplina in età contemporanea dal punto di vista dei materiali impiegati, delle nuove tecnologie di fabbricazione, delle nuove possibilità formali. Il database creato si può consultare al link <https://ssc.arq.up.pt/>.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte prima

Cap. 2. Stereotomia: una panoramica sulla disciplina

esplorare le potenzialità della stampa 3D di grandi dimensioni, proponendo attivamente nuove soluzioni architettonico-costruttive che possano rappresentare il futuro della disciplina stereotomica.

Fig. 9. La Voûte de LeFevre realizzata da Matter Design nel 2015 (© Design).



Fig. 10. La Armadillo Vault, realizzata dal Block Research Group ed esposta in occasione della Biennale di Architettura di Venezia del 2016 (© Iwan Baan).



2.2. Le ricerche della “scuola barese” di Architettura sulla disciplina stereotomica

2.2.1. L'identità della “scuola barese”

È stato già accennato che il presente lavoro si colloca all'interno di uno specifico filone di ricerca legato alla stereotomia e portato avanti da circa vent'anni nel dipartimento di Architettura del Politecnico di Bari.

Il focus sulla disciplina stereotomica della facoltà di Architettura di Bari è stata una diretta conseguenza della scelta del suo fondatore – il prof. Claudio D'Amato Guerrieri – di creare una vera e propria “scuola barese”, con una forte identità incentrata sulla riscoperta del materiale lapideo. La pietra, infatti, è profondamente radicata nella tradizione architettonica pugliese e introdurla in qualità di principale tematica di studio ha consentito al prof. D'Amato di rendere la facoltà di Architettura di Bari una facoltà a chiara vocazione territoriale, differentemente dalle altre scuole del panorama italiano.

Fig. 11. Claudio D'Amato Guerrieri ritira il premio Presidente della Repubblica per l'architettura dal Presidente Sergio Mattarella, il 10 Marzo 2016 (© ilikepuglia).



Tale intento è stato da lui stesso espresso durante un dialogo con Paolo Portoghesi trascritto nel libro *Studiare l'Architettura. Un vademecum e un dialogo*:

«Quando nel 1990 fui mandato dal Ministro Ruberti a fondare la Facoltà di Bari, per me fu come quando Enea portò via il Palladion da Troia; e cercai – cosa che poi ho fatto in questi anni – di impiantare dentro questa scuola quello che io ritenevo l'insegnamento giusto che ho ricevuto da te [Paolo Portoghesi, N.d.A.] e dalla “Scuola” di Roma. Però Roma è costruita col mattone, mentre la Puglia è stata una straordinaria civiltà architettonica della pietra. E incominciai a pensare come queste due eredità potevano sposarsi insieme, proprio ascoltando il luogo. Perché è evidente: costruire in Puglia è diverso che costruire nel Lazio, il càrparo non è il travertino, e questo è un primo dato importante²⁹».

2.2.2. *Le ricerche sulla stereotomia*

L'interesse del prof. D'Amato verso il materiale lapideo si è tradotto sia in una serie di studi sull'architettura del bacino del Mediterraneo – di cui anche la Puglia fa parte – sia, parallelamente, nella ripresa della stereotomia dal punto di vista teorico e pratico: non solo approfondimenti riguardanti le architetture stereotomiche del passato, ma anche ricerche miranti a innovare questa disciplina tramite l'uso delle moderne tecnologie CAD e CAM.

Il professore, a tal proposito, ha dichiarato:

«Naturalmente l'architettura di pietra che noi pratichiamo non è soltanto una architettura tradizionale ma riprende la nobile arte della stereotomia che come dicevamo prima in Italia soltanto Guarino Guarini e poi Vittone praticarono, e che poi fu completamente negletta. [...] Noi all'interno della Facoltà abbiamo cercato, cerchiamo di riprendere questa nobile tradizione sposandola con la moderna tecnologia informatica³⁰».

Ciò ha portato alla scrittura di svariate tesi di dottorato incentrate su questo argomento, a partire dal dottorato in consorzio con l'Università di Palermo, attivo fra il 1993 e il 2000. Tra il 1997 e il 1999, infatti, il corso è

²⁹ D'Amato Guerrieri, C., *Studiare l'Architettura. Un vademecum e un dialogo*, Roma, Gangemi Editore, 2007, p. 175.

³⁰ Ivi, p. 185.

stato dedicato al tema *Centro e memoria nell'architettura del Mediterraneo*³¹ e, tra le tesi prodotte, quella del prof. Francesco Defilippis, del 2000, – intitolata *Architettura in pietra e stereotomia* – è stata la prima focalizzata sulla disciplina stereotomica, con un'impostazione di tipo storico-critico.

È seguita quella del prof. Fallacara, del 2003, – dal titolo *Il paradigma stereotomico nell'arte del costruire. Dalla natura sincretica della modellazione digitale alla progettazione/costruzione di elementi architettonici in pietra da taglio* – facente parte del successivo corso di dottorato della facoltà di Architettura del Politecnico di Bari e intitolato *Progettazione Architettonica per i Paesi del Mediterraneo*³². Questa ricerca è fortemente improntata sulla costruzione e sull'innovazione.

Tra le ricerche successive dedicate alla stereotomia durante il dottorato del Politecnico di Bari e del dottorato in consorzio con l'Università di Roma Tre – intitolato *Architettura: Innovazione e Patrimonio* e attivo dal 2013 al 2019³³ – si segnalano le seguenti:

- Francesco Scricco, *Tipo, forma e struttura nelle architetture di Bernardo Antonio Vittone. Le chiese a pianta centrale nelle "istruzioni diverse"*, dottorato di ricerca in *Progettazione Architettonica per i Paesi del Mediterraneo* (Politecnico di Bari), XXIII ciclo, 2011. Tutor: Claudio D'Amato Guerrieri.
- Graziella Fittipaldi, *Spazio, forma e struttura nelle chiese di Guarino Guarini*, dottorato di ricerca in *Progettazione Architettonica per i Paesi del Mediterraneo* (Politecnico di Bari), XXIII ciclo, 2011. Tutor: Claudio D'Amato Guerrieri.
- Roberta Gadaleta, *Stereotomia della cupola nell'architettura di pietra. Studio della tradizione e ricerca di nuove morfologie di apparecchiatura*, dottorato di ricerca in *Architettura: Innovazione e Patrimonio*, Consorzio Argonauti (Università degli Studi Roma Tre e Politecnico di Bari), XXIX ciclo,

³¹ Montalbano, C., *Verso il Mediterraneo. Luci e ombre della dimensione Mediterranea della scuola di Architettura di Bari*, in 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, pp. 281-294.

³² Ibid.

³³ Ibid.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

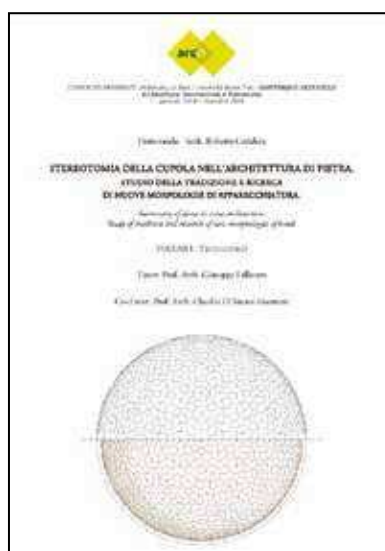
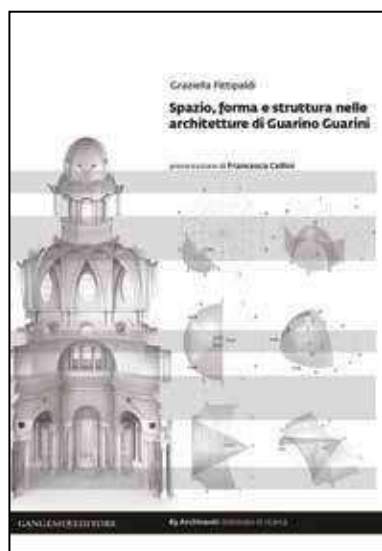
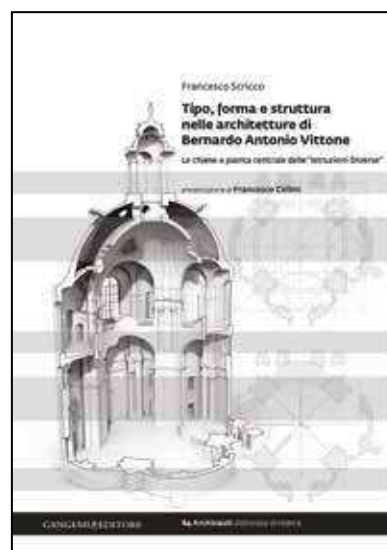
Parte prima

Cap. 2. Stereotomia: una panoramica sulla disciplina

2016. Tutor: prof. Giuseppe Fallacara, co-tutor: prof. Claudio D'Amato Guerrieri.

- Maurizio Barberio, *Nuove frontiere dell'architettura in pietra. Progettazione parametrico-computazionale, fabbricazione e costruzione*, dottorato di ricerca in *Architettura: Innovazione e Patrimonio*, Consorzio Argonauti (Università degli Studi Roma Tre e Politecnico di Bari), XXX ciclo, 2017. Tutor: prof. Giuseppe Fallacara, co-tutor: prof. Alberto Pugnale.

Fig. 12. Frontespizi delle principali tesi di dottorato di ricerca inerenti la stereotomia prodotte nei corsi di dottorato in Architettura del Politecnico di Bari o di consorzi universitari di cui esso faceva parte.



La visione pionieristica di Claudio D'Amato ha favorito il susseguirsi di numerose sperimentazioni che si sono concretizzate in prototipi sia in piccola che in grande scala, realizzati in collaborazione con svariate aziende. Tali dimostratori sono stati, negli anni, i protagonisti di eventi di livello internazionale, come le mostre organizzate annualmente durante la fiera Marmomac³⁴ di Verona.

Una delle più importanti occasioni per mostrare gli avanzamenti delle ricerche della facoltà di Architettura di Bari, però, è stata *Città di Pietra – Cities of Stone*, una sezione della X Mostra Internazionale di Architettura della Biennale di Venezia curata da D'Amato nel 2006. Durante questo evento, oltre a tavole e plastici, sono stati esposti due prototipi a scala reale, esito della tesi di dottorato del prof. Giuseppe Fallacara: l'obelisco Alexandros – un obelisco realizzato in conci osteomorfi – e il portale Abeille (fig. 13) – una volta a botte tassellata tramite conci di Abeille

Fig. 13. Il Portale Abeille, posto all'ingresso della mostra *Città di Pietra*, Organizzata in occasione della X Mostra Internazionale di Architettura della Biennale di Venezia (© Giuseppe Fallacara).

³⁴ Il Marmomac – fiera dei marmi e delle macchine – «è la più importante fiera a livello mondiale dedicata all'intera filiera della produzione litica, dalla cava al prodotto lavorato, dalle tecnologie e dai macchinari agli utensili» (fonte: www.marmomac.com).



deformati topologicamente.

Questi manufatti sono stati realizzati interamente in pietra sfruttando le potenzialità della modellazione CAD e dell'uso delle macchine a controllo numerico per il taglio del materiale lapideo.

2.3. Stereotomia 2.0: le nuove frontiere della disciplina stereotomica

L'interesse per la pietra e per l'innovazione della disciplina stereotomica continua a essere e portato avanti dal prof. Fallacara insieme al New Fundamentals Research Group³⁵. Numerose sono le tematiche affrontate nel corso degli anni e innumerevoli le sperimentazioni condotte, la maggior parte delle quali strettamente connesse a un approccio pratico, che ha dato come esito finale dei dimostratori fisici.

Si sono studiate le possibili deformazioni topologiche di altri brevetti storici oltre alla volta piana di Abeille, come quello della volta piana di Truchet; si sono avanzate ipotesi per varianti di tassellazione a partire da questi stessi

Fig. 14. Variazione del concio di Abeille per tassellare una cupola con un pattern triangolare (© Giuseppe Fallacara).

³⁵ Il New Fundamentals Research Group è un gruppo di ricerca guidato dal prof. Fallacara – e di cui la scrivente fa parte –, che sviluppa progetti legati al tema della relazione tra tradizione e innovazione in architettura.

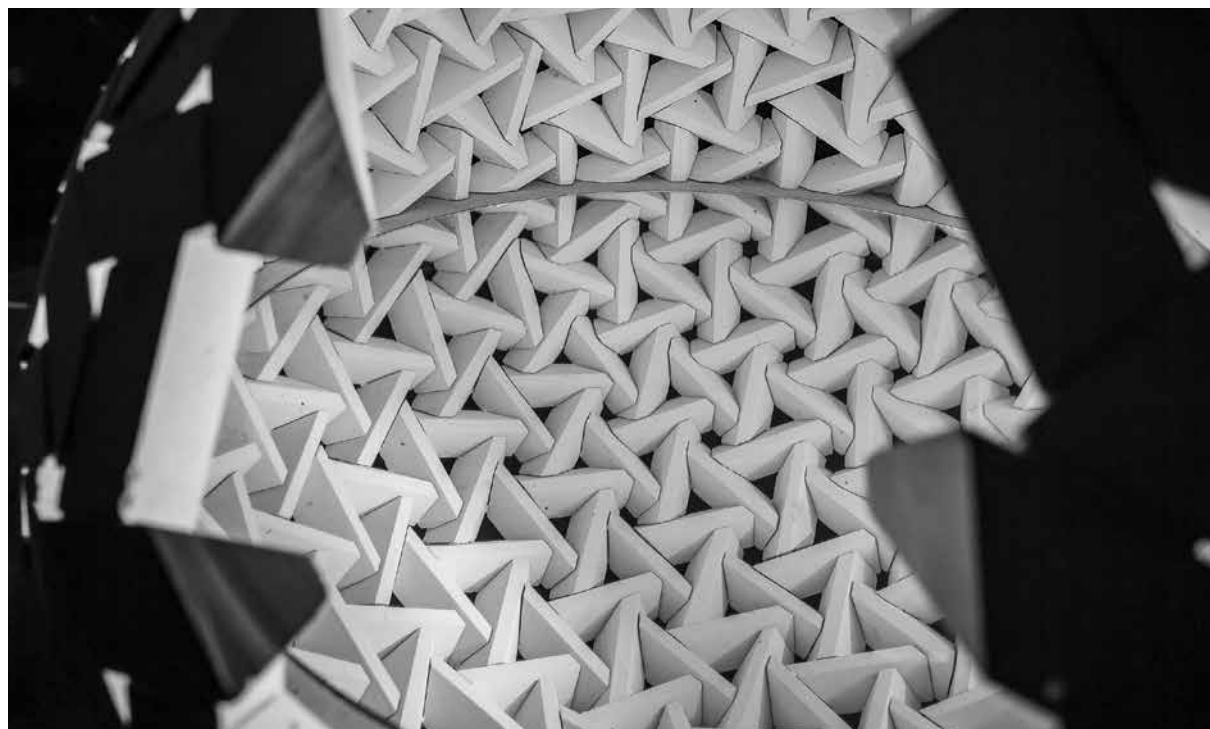




Fig. 15. Porzione in scala 1:5 della cupola della chiesa dei Ss. Cirillo e Metodio a Marino, progettata da Giuseppe Fallacara, Francesco Scricco e Graziella Fittipaldi ma non realizzata. Il prototipo, realizzato con macchine a controllo numerico, è stato esposto alla mostra *100% Gravity*, in occasione del Marmomac 2012 (© Francesco Scricco).

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte prima

Cap. 2. Stereotomia: una panoramica sulla disciplina

brevetti; si sono studiati svariati modelli di scale elicoidali autoportanti; si è lavorato su conci incastrati tramite giunti a doppia curvatura; si è studiata la possibilità di realizzare superfici diafane; si è messo a punto il concio hypar, un blocco a forma di paraboloide iperbolico da produrre con il minimo sfrido di materiale e da assemblare in maniere differenti, ottenendo diaframmi chiusi o traforati (fig. 16).

I più recenti avanzamenti riguardano l'innovazione della stereotomia attraverso l'impiego di materiali e tecnologie all'avanguardia: non più solo pietra naturale o ricomposta, ma anche fibre di carbonio, fibre di vetro, malte stampate in 3D.

L'argomento della stampa 3D applicata alla stereotomia, che è il tema principale di questa tesi di dottorato, è già stato oggetto di alcuni esperimenti: si è, infatti, effettuata una prova di stampa del concio Hypar in PLA con una stampante Delta WASP 3 mt e si è anche avviata una sperimentazione sullo stesso blocco usando un braccio robotico per estrarre malta geopolimerica, ossia una malta a base di geopolimeri, in collaborazione con le aziende SNBR³⁶ e Renca³⁷.

Fig. 16. HyparWall, un prototipo di parete diafana realizzata con i conci Hypar, progettati da Giuseppe Fallacara e realizzati in collaborazione con l'azienda pugliese Pi.Mar.
(© Giuseppe Fallacara).

³⁶ <https://www.snbr-stone.com/>

³⁷ <https://www.renca.org/>



I geopolimeri sono composti a base di alluminosilicati che possono essere impiegati in numerosi settori, tra cui quello edilizio. Attraverso la reazione chimica tra una polvere attiva e un liquido salino, si ottiene un materiale inorganico con una precisa configurazione cristallina. Recentemente sta crescendo l'interesse nei confronti delle malte geopolimeriche come potenziali sostituti *green* del cemento portland poiché si possono ottenere a partire da scarti industriali (ceneri volanti, loppe d'altoforno, ecc.). Inoltre possono presentare caratteristiche meccaniche superiori a quelle del calcestruzzo e una migliore resistenza alle aggressioni chimiche³⁸. L'esperimento riguardante la stampa di malte geopolimeriche, tuttavia, è stato interrotto a seguito dell'inizio della pandemia di Covid-19 e non è più stato ripreso.

³⁸ Alessandrini, F., De Biaggio, N., Pedrocco, L., Reggiani, A., «Geopolimeri a media ed alta resistenza: il futuro sicuro e durevole delle costruzioni», *Ingenio*, 1 luglio 2020, <https://www.ingenio-web.it/articoli/geopolimeri-a-media-ed-alta-resistenza-il-futuro-sicuro-e-durevole-delle-costruzioni/>.



Fig. 17. La sperimentazione di stampa con malta geopolimerica: in alto il braccio robotico utilizzato per la sperimentazione e in basso la stampa di un provino (© Giuseppe Fallacara).



PARTE SECONDA

Capitolo 3

Nuove tecnologie per la costruzione: l'additive manufacturing

3.1. La stampa 3D nell'era dell'industria 4.0.

La manifattura additiva, o *additive manufacturing* (AM), è un processo di fabbricazione che prevede l'ottenimento di una geometria attraverso un'aggiunta progressiva di materiale. Essa, dunque, si distingue dalla manifattura sottrattiva, o *subtractive manufacturing* (SM).

L'uso della pietra è tradizionalmente associato al secondo metodo di fabbricazione: dal blocco lapideo viene rimossa la materia in eccesso fino a ricavarne l'oggetto finito e, se nell'antichità quest'operazione veniva svolta manualmente dagli scalpellini, oggi si effettua, invece, con le macchine a controllo numerico.

All'interno di questa tesi, tuttavia, si approfondirà l'applicazione dell'*additive manufacturing* a una disciplina strettamente connessa alla pietra e, dunque, alla manifattura sottrattiva. Anche la fabbricazione additiva affonda le radici in pratiche tradizionali, che prevedevano la plasmazione della materia tramite addizione utilizzando le mani – come nel caso della lavorazione col tornio – o altri strumenti – per esempio estrusori manuali per la lavorazione dell'argilla o della pasta o la *sac à poche* nel campo della pasticceria.

Differentemente da queste pratiche, la stampa 3D è una tecnologia di fabbricazione digitale: attraverso l'addizione di materiale viene reso concreto un oggetto precedentemente modellato digitalmente tramite un software di modellazione CAD.

Si tratta di una tecnologia emergente, che sta rapidamente prendendo piede in numerosissimi settori dell'industria 4.0 per via delle sue forti potenzialità, poiché non solo offre una grande libertà dal punto di vista della customizzazione del prodotto senza la produzione di stampi o casseforme – abbattendo, quindi costi e sprechi di materiale se non si tratta di produzione su larga scala –, ma si sta sviluppando anche in numerose direzioni differenti. Ad oggi sono tante le tecnologie di stampa 3D disponibili sul mercato; esse differiscono tra loro per materiale stampato – plastica, metallo, argilla, malte cementizie, ecc. –, per scala – si va dalla stampa di grandi dimensioni, adatta all'architettura, alla stampa di precisione, adatta per protesi mediche – e per modalità di fabbricazione.

L'*additive manufacturing* sta prendendo piede nel settore industriale soprattutto per la versatilità che offre in termini di personalizzazione: un oggetto può essere plasmato ad hoc ed essere prodotto con cavità

interne che lo alleggeriscano, può essere lavorato con macchine specifiche in grado di supportare l'estrusione di più materiali contemporaneamente, può essere modificato tramite algoritmi di ottimizzazione topologica³⁹ per eliminare materiale in eccesso senza comprometterne le prestazioni.

3.2. Alle origini della stampa 3D

Uno dei primi esperimenti riguardanti la possibilità di ottenere un oggetto concreto a partire da dati forniti da un computer viene condotto da Wyn Kelly Swainson, uno studente universitario danese che brevetta nel 1977 un sistema per realizzare solidi tridimensionali attraverso la polimerizzazione di resina con due laser aventi differenti lunghezze d'onda⁴⁰. Questo brevetto, tuttavia, non viene mai commercializzato⁴¹.

Il primo sistema per la realizzazione di oggetti tridimensionali a partire da dati digitali ad essere reso commerciale è la stereolitografia (SLA), brevettata nel 1986 da Charles W. Hull, ingegnere statunitense: il processo di fabbricazione descritto da Hull consiste nel creare l'oggetto desiderato sezione per sezione. Un raggio UV indurisce strati successivi di resina fino al completamento del modello⁴². Ancora oggi la 3D Systems⁴³, fondata da Hull, è un'azienda leader a livello mondiale nella produzione di stampanti

³⁹ Per ottimizzazione topologica si intende un processo di progressivo svuotamento di un modello 3D mirato a migliorarne l'efficienza secondo un preciso obiettivo. Per esempio si può avere intenzione di ottimizzare la rigidità di un oggetto, date una serie di condizioni al contorno (carichi e vincoli), perciò, in questo caso, il software di ottimizzazione rimuoverà le porzioni di massa che risultano superflue per questo specifico target. Lo svuotamento risulterà differente se anche l'obiettivo varia. Un'ottimizzazione volta a massimizzare la rigidità di un oggetto sarà diversa da un'ottimizzazione volta a minimizzarne la massa.

⁴⁰ Swainson, W. K., *Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product*, 1977, brevetto US4041476.

⁴¹ Su, A., Al'Aref, S. J., *History of 3D Printing*, in Al'Aref, S. J., Mosadegh, B., Dunham, S., Min, J. K. (a cura di), *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, Elsevier, Academic Press, 2018, pp. 1-10.

⁴² Hull, C. W., *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, 1986, brevetto US4575330.

⁴³ <https://www.3dsystems.com/>

Fig. 18. Chuck Hull e la stampante da lui prodotta per la stampa 3D tramite stereolitografia.



3D e materiali di stampa.

Qualche anno dopo cominciano a emergere tecnologie differenti di *additive manufacturing*.

Nel 1989 Frank G. Arcella e Gerald G. Lessmann dell'azienda Westinghouse Electric brevettano un processo di fabbricazione che prevede la realizzazione di oggetti tridimensionali sfruttando la fusione di polveri (per esempio quelle metalliche). Un laser le fonde strato dopo strato e le particelle aderiscono tra loro fino a solidificarsi⁴⁴. Tale processo è oggi conosciuto come *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF).

Sempre nel 1989, qualche mese più tardi, S. Scott Crump deposita i documenti per brevettare con la sua azienda Stratasys⁴⁵ un metodo di fabbricazione basato sull'estrusione di materiale. La sua invenzione prevede il deposito di materiale su un piatto da parte di un ugello, procedendo strato per strato, sulla base dei dati geometrici forniti in input attraverso un modello 3D digitale. Il materiale da estrarre è fornito in forma di filamento flessibile, che viene portato alla temperatura di fusione all'interno dell'ugello in modo da poter essere depositato sul piatto. Crump illustra la possibilità di avere un ugello collegato a due materiali differenti, che possono essere estrusi in maniera alternata, formando differenti *layer* dell'oggetto da stampare.

È interessante notare come Crump sottolinei, all'interno della relazione descrittiva del suo brevetto, che ciò che contraddistingue la tecnologia da lui messa a punto dalle precedenti tecniche di fabbricazione additiva –

⁴⁴ Arcella, F. G., Lessmann, G. G., *Casting Shapes*, 1989, brevetto US4818562.

⁴⁵ <https://www.stratasys.com/it/>

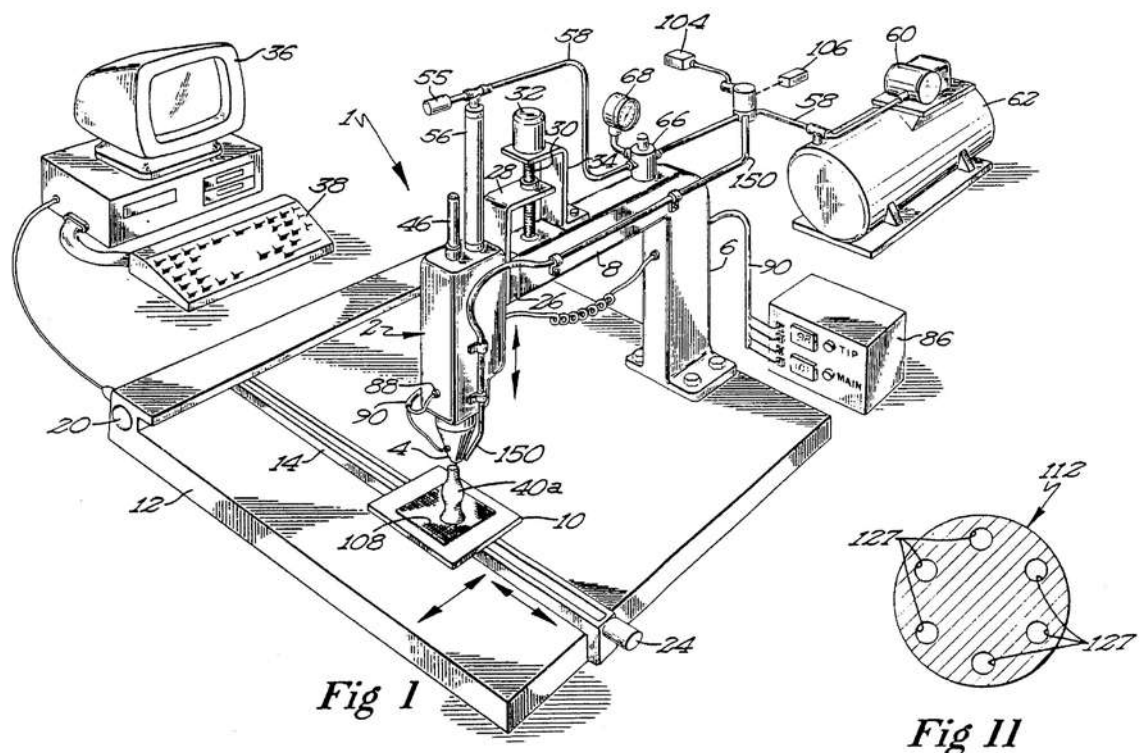
tra cui menziona esplicitamente la stereolitografia di Hull e il brevetto di Arcella e Lessmann – è la semplicità di utilizzo e l'economicità. Egli, infatti, afferma:

«[...] A need continues to exist for a relatively simply and efficient process and apparatus by means of which designers may design and create three-dimensional objects at office work stations. The process and apparatus disclosed herein meets that need with the same ease and simplicity of using a desk-top computer and printer, with the entire modeling process being carried out at the operator's CAD work station» («[...] Continua a esistere il bisogno di un processo e di un sistema di fabbricazione relativamente semplici ed efficienti attraverso cui i progettisti possano progettare e creare oggetti tridimensionali presso postazioni di lavoro in ufficio. Il processo e la strumentazione qui descritta soddisfa quel bisogno con lo stesso agio e la stessa semplicità di utilizzo di un computer desktop e di una stampante, con l'intero processo di modellazione completato alla workstation di un operatore CAD»)»⁴⁶.

Ancora altri tipi di tecnologie di *additive manufacturing* sono sviluppati negli anni successivi, tuttavia le stampanti *desktop* oggi più diffuse si basano su

⁴⁶ Crump, S. S., *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*, 1992, brevetto US512329, p. 5.

Fig. 19. Schema della stampante inventata da Scott Crump, tratta dal brevetto del 1989.



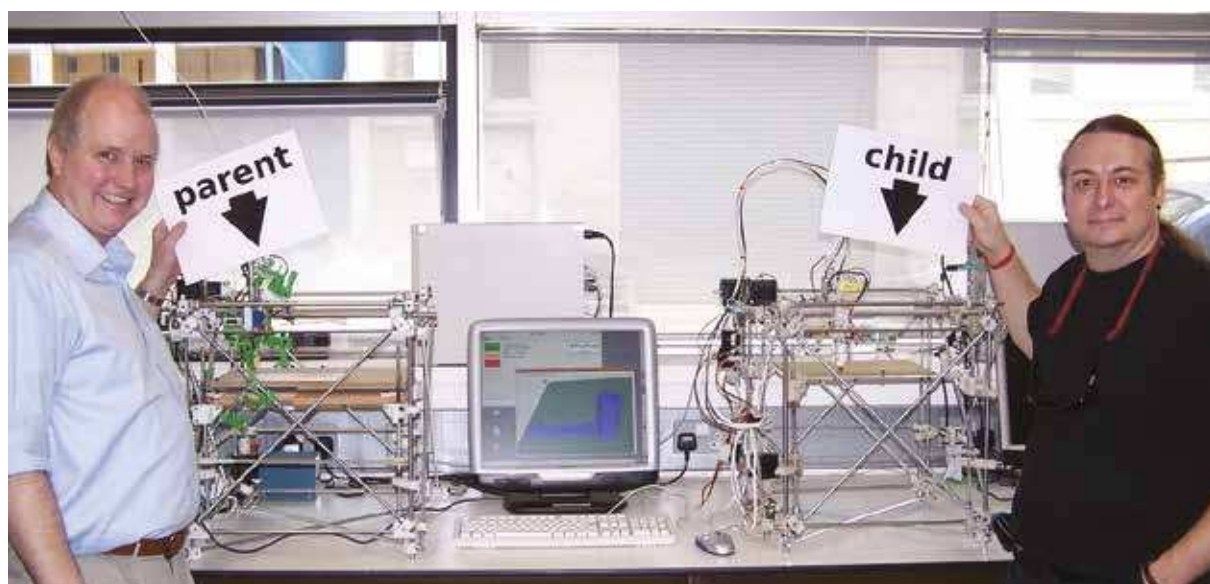
quella messa a punto da Crump, proprio per le ragioni da lui descritte. Tale tecnologia è detta FDM, ossia *Fused Deposition Modeling*, perché prevede l'estrusione di materiali – soprattutto plastiche – che vengono portati a fusione all'interno dell'ugello e si solidificano nuovamente una volta depositati. La diffusione massiccia di questo tipo di stampanti avviene a partire dal 2005, quando il brevetto scade e altre aziende possono produrre macchinari simili, ampliando notevolmente il bacino di utenza⁴⁷. In particolare Adrian Bowier – ingegnere e matematico britannico – avvia il RepRap Movement⁴⁸, un progetto per realizzare stampanti 3D *open source* che possano autoreplicarsi, in modo da rendere la stampa 3D accessibile a tutti. Le stampanti RepRap hanno molti componenti in plastica, che possono essere ottenuti tramite stampa 3D da altre stampanti RepRap, mentre i componenti metallici sono facilmente reperibili in qualsiasi ferramenta (fig. 20). Il concetto di *open source* dà un forte impulso alla diffusione e al progressivo miglioramento della tecnologia della stampa 3D: numerosi designers e progettisti iniziano a condividere online i propri modelli di stampanti accompagnati da appositi tutorial, in modo da permettere a chiunque di realizzare la propria stampante personale pur senza competenze specifiche⁴⁹.

Fig. 20. Fotografia di due stampanti RepRap “parent” e “child”: la stampante sulla destra, detta “figlia”, è stata costruita con componenti stampati con quella a sinistra, detta “madre”.

⁴⁷ Su, A., Al'Aref, S. J., *op. cit.*

⁴⁸ <https://reprap.org/wiki/RepRap>

⁴⁹ Su, A., Al'Aref, S. J., *op. cit.*



Come già detto, il notevole sviluppo della fabbricazione additiva nell'era dell'Industria 4.0 – ossia della Quarta Rivoluzione Industriale, quella legata all'automazione – riverbera in molteplici settori della produzione: non riguarda solo il settore del design, ma anche della moda, dell'oreficeria, dell'ingegneria, della medicina e, non da ultimo, dell'architettura.

3.3. Lo sviluppo della manifattura additiva in grande scala: dagli antecedenti storici alla stampa 3D vera e propria

I processi di costruzione possono definirsi, nella maggior parte dei casi, dei processi additivi, poiché prevedono la progressiva giustapposizione di elementi costruttivi, i quali a loro volta possono essere ricavati tramite manifattura additiva – se si tratta di componenti in terracotta, calcestruzzo o altre malte – oppure tramite manifattura sottrattiva – quando si tratta di componenti in pietra o legno.

In generale, dunque, la manifattura additiva è storicamente legata all'architettura e all'edilizia perché alcuni dei più diffusi materiali da costruzione, come il calcestruzzo o l'argilla, ne richiedono l'applicazione. Esistono alcuni casi in cui non sono i componenti a essere ottenuti per addizione, ma l'edificio stesso: sin dall'antichità sono ravvisabili tecniche che prevedono la progressiva aggiunta di materiale per la realizzazione di intere parti di organismi architettonici. Un esempio significativo è costituito dalla tecnica del *pisé*, utilizzata da tempo in molte parti del mondo per costruire edifici in terra cruda: la terra viene compattata all'interno di casseforme strato dopo strato, fino a raggiungere l'altezza desiderata⁵⁰. I manufatti ottenuti in questa maniera presentano delle caratteristiche striature orizzontali, che rendono evidenti i vari *layer* di materiale (fig. 21). Il *pisé*, dunque, si può considerare una tecnica di manifattura additiva, seppur riconducibile alla tradizione e a una dimensione per lo più artigianale. La fabbricazione per addizione è già stata usata in passato anche nel mondo lapideo: la cosiddetta pietra artificiale o pietra ricomposta, che già veniva utilizzata dai Romani in architettura – il cosiddetto *opus cementicium* – diventa parte integrante del linguaggio architettonico di fine Ottocento

⁵⁰ Ciancio, D., Beckett, C., *Rammed earth: an overview of a sustainable construction*, in *Proceedings of the 3rd Sustainable Construction Materials and Technologies Conference. Sustainable construction materials and technologies* (Kyoto, Giappone, 18 agosto 2013), pp. 1-9, 2013.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 3. Nuove tecnologie per la costruzione: l'additive manufacturing



Fig. 21. Il Nk'Mip Desert Cultural Centre a Osoyoos (Canada), progettato dallo studio DIALOG e realizzato in terra con la tecnica del pisé (© Nic Lehoux Photography).

e inizio Novecento.

Come si legge nel contributo di Claudia Calabria all'interno del volume *Stereotomia Ri-composta* di Giuseppe Fallacara, «[...] la pratica di imitare i materiali di pregio è diffusa in occidente fin dall'epoca romana in cui si simulava l'effetto della pietra tramite tinte applicate sull'intonaco o stucchi di finitura costituiti da un impasto di calce, gesso, pigmenti colorati e polvere di pietra calcarea, ma la comparsa della pietra artificiale nel senso moderno del termine si può collocare alla metà del XIX secolo in seguito al brevetto del cemento Portland da parte di Joseph Aspdin. [...] Le possibilità di espressione linguistica che il materiale permetteva hanno, in seguito, dato la possibilità di un'applicazione sistematica nell'implementazione dell'apparato decorativo di gran parte della produzione architettonica di fine '800, inizi '900 (Eclettismo, Art Nouveau, Liberty) creando in alcuni casi accostamenti inediti o anche dando vita a una concezione sinergica di decorazione e struttura. Quest'enorme diffusione era strettamente legata all'economicità di realizzazione che ben si adattava ai canoni architettonici del periodo, grazie anche alla possibilità di sfornare più getti su un unico modello avendo quindi più elementi seriali di notevole complessità a costi competitivi»⁵¹.

Sin dai primi decenni del Novecento, inoltre, sono state condotte sperimentazioni per mettere a punto sistemi costruttivi basati sempre

Fig. 22 (a sinistra). concio Hypar realizzato in pietra ricomposta con l'ausilio di stampi (© Giuseppe Fallacara).

Fig. 23 (a destra). concio osteomorfo progettato da Giuseppe Fallacara e Yuri Estrin e realizzato in pietra ricomposta (© Giuseppe Fallacara).

⁵¹ Calabria, C., *La pietra artificiale dalle origini ad oggi: evoluzione della tecnica e applicazioni*, in Fallacara, G., *Stereotomia Ri-composta. Evoluzione di una disciplina che insegna a costruire lo spazio*, Roma, Aracne Editrice, 2012, pp. 71-92.



sull'addizione di materiale, ma attraverso l'uso di specifici macchinari, puntando a un'importante innovazione nel settore delle costruzioni. Tali sperimentazioni possono considerarsi dei veri e propri antecedenti storici dell'uso della stampa 3D cementizia nel campo dell'edilizia e, per questo, è doveroso menzionarne le principali, in modo da poter avere un quadro più completo di come l'*additive manufacturing* applicato all'architettura si sia evoluto. Una caratteristica comune a queste invenzioni è la volontà di creare sistemi costruttivi che permettano di realizzare forme piuttosto complesse ma che si mantengano economici, di semplice utilizzo e che non necessitino di un'ingente quantità di manodopera: si tratta proprio di alcune delle caratteristiche che oggi stanno contribuendo alla diffusione massiccia della stampa 3D sia di piccola che di grande scala.

Di seguito si riportano in maniera sintetica alcuni brevetti significativi risalenti al secolo scorso, a partire dai primi decenni fino alla seconda metà:

- **1943.** William E. Urschel brevetta la *Molding and depositing machine for solidifiable plastic materials*. Si tratta di un macchinario pensato per depositare strati successivi di calcestruzzo, in modo da costituire pareti monolitiche. Il calcestruzzo viene progressivamente inserito in un serbatoio tronco-piramidale, alla cui estremità si trova la bocchetta che deposita il materiale. L'impasto estruso viene appiattito lateralmente tramite due piastre circolari disposte ai lati dell'ugello, in maniera che la parete risulti liscia. L'ugello è posto all'estremità di un braccio fissato a un perno che ne perme la rotazione: le strutture realizzate hanno, dunque, una pianta circolare⁵². Con questo macchinario vengono costruiti non solo piccoli edifici cilindrici, ma anche cupole sferiche con oculo centrale (figg. 25-28). Lo stesso Urschel, successivamente, deposita i brevetti di varie versioni migliorate della sua invenzione: nel 1944 brevetta la *Wall Building Machine*⁵³ e nel 1952 la *Machine for building walls of plastic hardenable materials*⁵⁴.

La meccanica messa a punto da Urschel è simile a quella del "compasso"

Fig. 24 (alla pagina seguente, in alto). Schema della macchina inventata da William Urschel, tratto dal brevetto del 1944.

Figg. 25-28 (alla pagina seguente, in basso). alcune foto d'epoca della *Wall building machine* di William Urschel e di alcuni prototipi realizzati (© Urschel Laboratories, Inc).

⁵² Urschel, E. W., *Molding and depositing machine for solidifiable plastic materials*, 1943, brevetto US2314468A.

⁵³ Urschel, E. W., *Machine for building walls*, 1944, brevetto US2339892A.

⁵⁴ Urschel, E. W., *Machine for building walls of plastic hardenable materials*, 1952, brevetto US2607100A.

inventato dall'architetto Hassan Fathy per la costruzione delle cupole e successivamente utilizzato dall'architetto Fabrizio Carola. In questo caso, tuttavia, il braccio fissato a un perno serve a posizionare mattoni invece che a depositare una malta fluida (fig. 29).

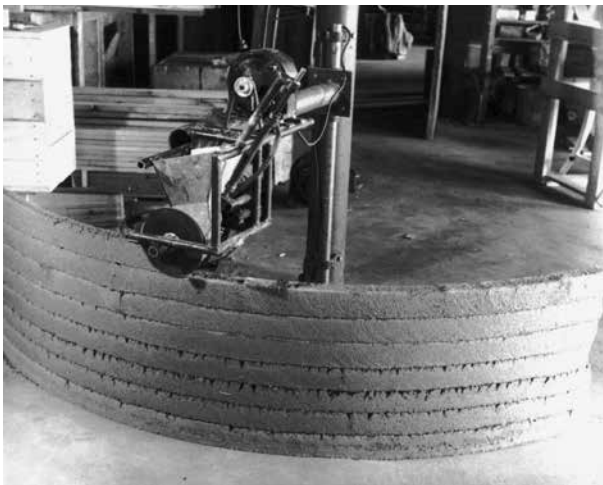
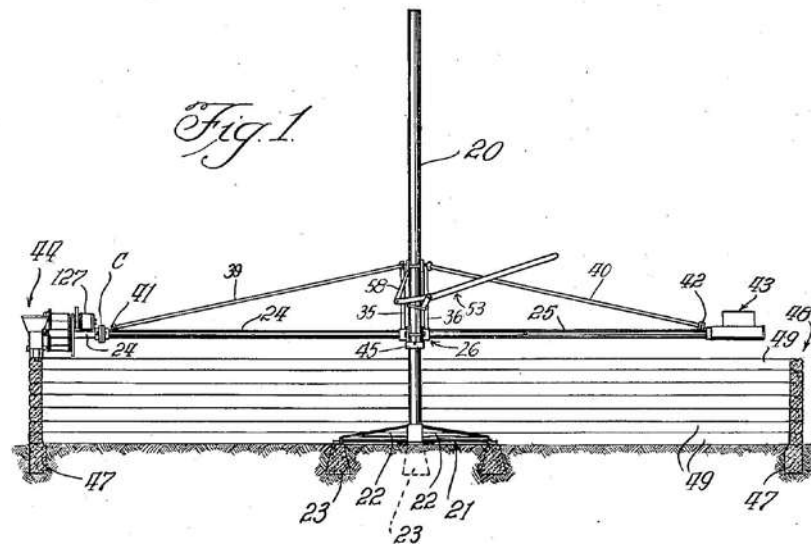


Fig. 29. Esempio di utilizzo del compasso inventato da Fathy e impiegato da Carola (© Architecture3D).



- **1959.** L'architetto americano James B. Winn Jr. brevetta il *Monolithic wall forming apparatus*, un altro macchinario per la realizzazione di muri monolitici *in situ*. Esso viene descritto come un sistema che consente di realizzare sia muri rettilinei o curvilinei in pianta sia rettilinei o curvilinei in elevato. Anche in questo caso si tratta di un braccio con un'estremità dotata di un ugello per l'estrusione del materiale e l'altra estremità fissata a un perno che ne consente la rotazione. In questo caso, tuttavia, il perno può anche scorrere lungo un binario. Differentemente dal brevetto di Urschel, che necessita di un operatore che versi costantemente la miscela di calcestruzzo nel serbatoio collegato all'ugello, questa nuova macchina prevede che il materiale sia attinto tramite un tubo da un serbatoio esterno⁵⁵.
- Una versione migliorata di questa macchina viene brevettata nel 1965. Tra le caratteristiche di questa nuova versione viene menzionata la possibilità di produrre un impasto additivato con materiali fibrosi, che ne incrementino la resistenza meccanica; inoltre è descritto un nuovo metodo di estrusione, il quale prevede l'uso di un sistema ad aria compressa che permette di regolare la fuoriuscita di materiale calibrando la pressione in base alla densità della miscela⁵⁶.

⁵⁵ Winn, J. B. Jr., *Monolithic wall forming apparatus*, 1959, brevetto US2877530A.

⁵⁶ Winn, J. B. Jr., *Monolithic wall forming apparatus*, 1965, brevetto US3195208A.

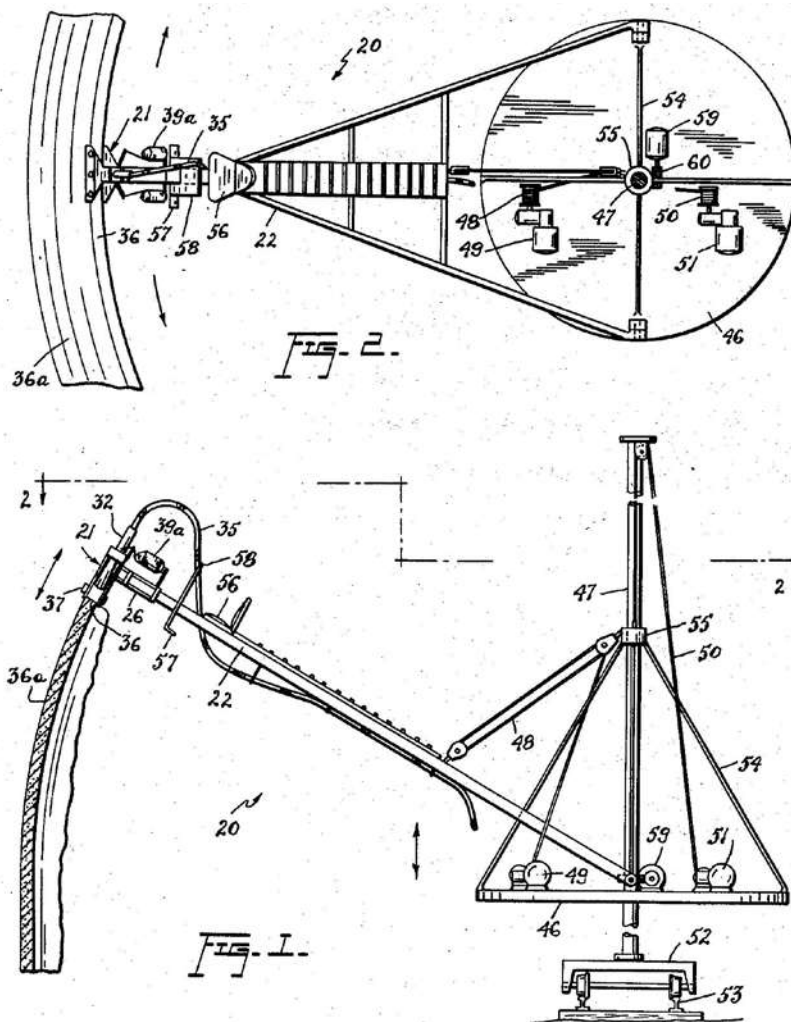


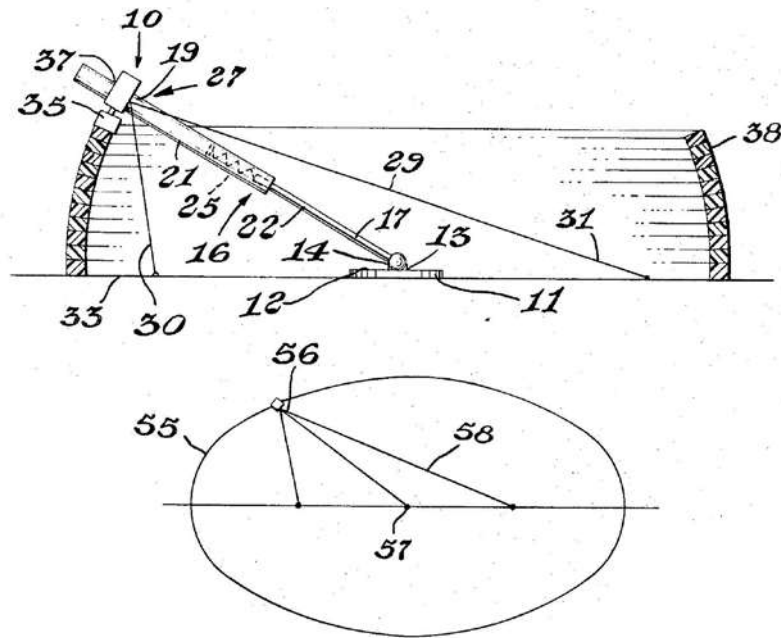
Fig. 30. Schemi della macchina inventata da James B. Winn Jr, tratti dal brevetto del 1959.

- **1968.** Fred J. Lowes brevetta l'*Apparatus for the preparation of elliptical structures*, un macchinario per la realizzazione di strutture a pianta ellittica. Similmente alle invenzioni precedentemente menzionate, è costituito da un braccio che presenta un estrusore di materiale a un'estremità ed è fissato a un perno all'altra estremità. In questo caso, tuttavia, la testa per l'estrusione è collegata anche a due cavi bloccati in corrispondenza dei fuochi dell'ellisse, pensati per guidarne il movimento⁵⁷ seguendo una curva ellittica secondo la costruzione geometrica "del giardiniere"⁵⁸.

⁵⁷ Lowes, F. J., *Apparatus for the preparation of elliptical structures*, 1968, brevetto US3376602.

⁵⁸ La costruzione geometrica del giardiniere è così definita perché impiegata dai giardinieri per disegnare aiuole ellittiche e prevede l'uso di una funicella – fissata alle estremità ai due fuochi dell'ellisse – e un punteruolo, il cui movimento è guidato dalla funicella stessa.

Fig. 31. Schemi della macchina inventata da Fred J. Lowes, tratti dal brevetto del 1968.



- **1988.** Paul T. Maddock brevetta la *Machine for building a dome or sphere*, un'invenzione per la realizzazione di cupole o spazi sferici senza l'utilizzo di centine o supporti. Come lo stesso Maddock spiega nella relazione descrittiva del progetto, lo scopo è quello di ottenere, ancora una volta, un sistema costruttivo semplice, che richieda poca manodopera, ma che sia anche facilmente trasportabile e utilizzabile in contesti più complessi, come lo spazio. Inoltre egli specifica che l'uso di un materiale fluido offre la possibilità di lavorare anche sulla componente estetica: piuttosto che dipingere la struttura a posteriori, si può pigmentare direttamente l'impasto in fase di costruzione al fine di ottenere i pattern colorati desiderati. Per quanto riguarda la sua strutturazione, è simile alle macchine già descritte in precedenza: un braccio fissato a un perno centrale e con un estrusore all'altra estremità. Il perno può anche essere sollevato tramite un pistone⁵⁹.

Tutti questi brevetti non possono considerarsi delle vere e proprie stampanti 3D poiché manca il passaggio dal mondo virtuale al mondo reale, ossia la possibilità di rendere concreto un oggetto modellato in 3D digitalmente. Sono tutti macchinari che funzionano in maniera analogica, tuttavia presentano alcuni principi che contraddistinguono molte

⁵⁹ Maddock, P. T., *Machine for building a dome or sphere* 1988, brevetto US4734021.

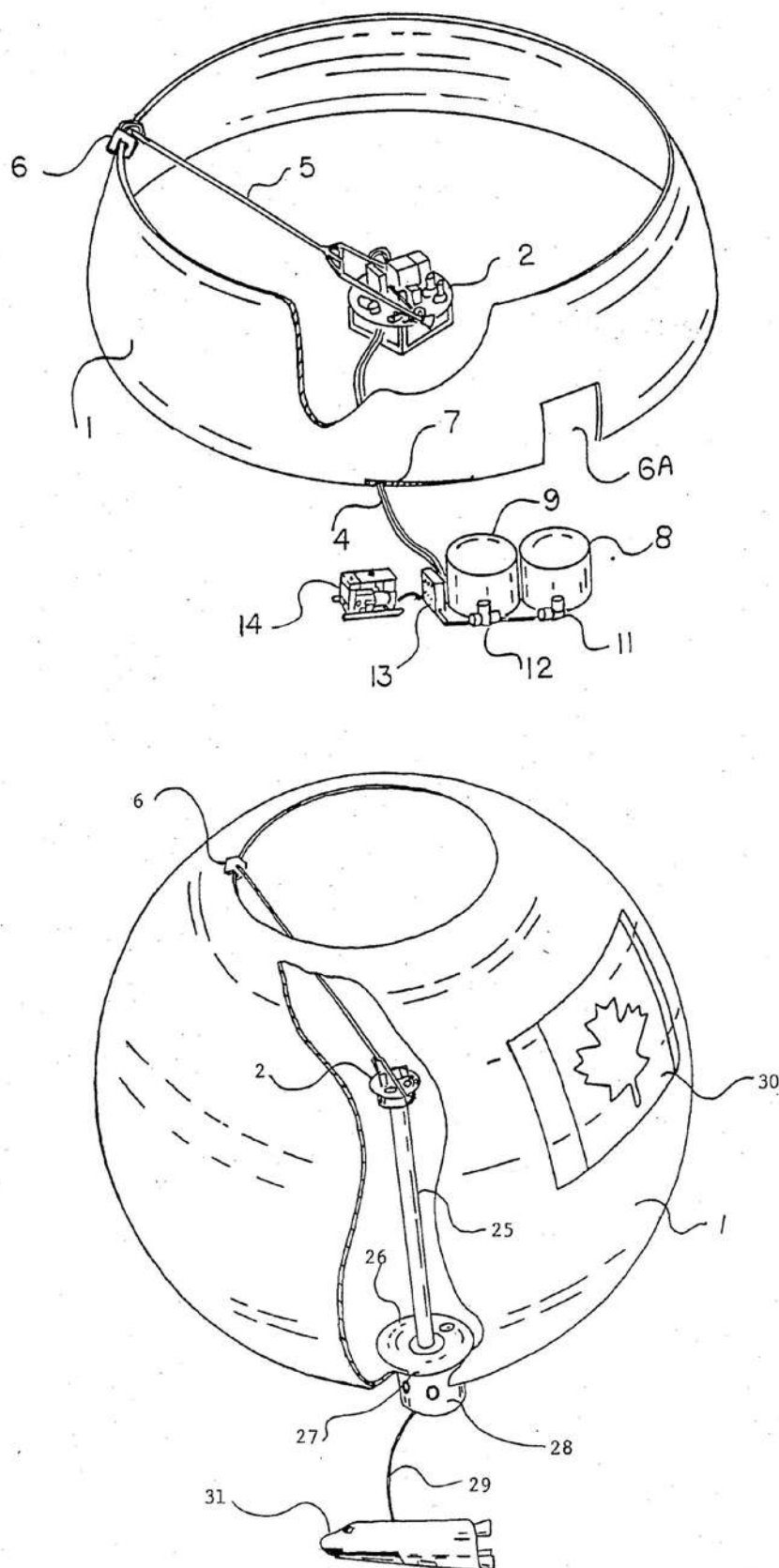


Fig. 32. Schemi della macchina inventata da Paul T. Maddock, tratti dal brevetto del 1988.

moderne stampanti 3D utilizzate in edilizia, come l'estrusione di una malta cementizia e l'uso di un braccio che ha la possibilità di ruotare intorno a un perno in più direzioni – nonostante oggi esista una maggiore libertà grazie all'introduzione dei bracci robotici multiasse.

Inoltre manifestano la volontà da parte dell'uomo di mettere a punto sistemi costruttivi semplici e pratici, che permettano di ottimizzare e velocizzare i processi di costruzione soprattutto di strutture che, diversamente, richiederebbero casseforme o centine di geometria complessa – si pensi alle cupole o agli edifici di pianta ellittica – con lo scopo di ridurre materiale di scarto e manodopera e di riuscire a costruire in luoghi meno ospitali, come l'ambiente extraterrestre – oggi la stampa 3D è uno dei metodi costruttivi prevalentemente indagati per la possibile costruzione di habitat nello spazio.

Come si è detto nel paragrafo precedente, i primi brevetti di sistemi di *additive manufacturing* per la prototipazione a partire da modelli digitali risalgono alla seconda metà degli anni Ottanta e, seppur inizialmente riguardino la produzione di oggetti di piccole dimensioni, nel giro di qualche anno iniziano a influenzare anche il settore delle costruzioni.

Nel 1996 l'ingegnere Behrokh Khoshnevis brevetta un nuovo sistema di prototipazione rapida per la realizzazione di oggetti tramite l'estrusione di materiale da costruzione fluido. Il sistema ideato da Khoshnevis prevede che all'ugello sia fissato un componente a L, che serve a sagomare la superficie superiore e laterale del materiale estruso, in modo che la finitura superficiale non sia caratterizzata dalle evidenti striature orizzontali tipiche della stampa 3D e che i *layer* aderiscano meglio tra loro, garantendo una più alta resistenza strutturale. Nella relazione del suo brevetto, infatti, egli evidenzia che uno dei punti deboli dei metodi di prototipazione rapida sviluppati fino a quel momento sia proprio la scarsa resistenza dovuta anche alle sezioni cilindriche dei *layer* che spesso causano infiltrazioni d'aria e imperfezioni. Altri importanti aspetti che Khoshnevis evidenzia delle precedenti tecnologie riguardano i tempi di prototipazione – parla di *range* di tempo che variano dalle cinque alle settanta ore per oggetti relativamente piccoli –, le dimensioni limitate – di solito inferiori al metro – e la limitatezza dei materiali utilizzabili.

Il macchinario da lui progettato non solo consente di utilizzare materiali già impiegati nell'*additive manufacturing*, come le termoplastiche e i fotopolimeri, ma permette di sfruttare anche quelli tipici del settore dell'edilizia, come

l'argilla o la malta cementizia. Tali miscele possono anche essere additivate con resine che ne cambino la pigmentazione o che – se combinate anche con fibre sintetiche – ne migliorino le prestazioni. Inoltre Khoshnevis spiega che una versione in grande scala di questo sistema consentirebbe la fabbricazione di oggetti più grandi, come elementi di arredo, componenti costruttivi, porte, componenti navali, ecc⁶⁰.

Come si può notare, nel progetto di Khoshnevis sono presenti alcuni elementi che ricorrono negli antecedenti storici precedentemente discussi: la prototipazione in grande scala usando materiali da costruzione, la possibilità di usare miscele speciali additivate con fibre, la rifinitura superficiale per mezzo di superfici piane poste in prossimità dell'ugello. Non è un caso che egli menzioni il brevetto di Maddock del 1988 all'interno della sua relazione.

Khoshnevis chiama il procedimento di fabbricazione da lui ideato *Contour Crafting*⁶¹ e, se egli inizialmente si limita alla prototipazione di piccoli oggetti, per lo più in argilla, successivamente produce un sistema di stampa di dimensioni maggiori, pensato per la costruzione di piccoli edifici. In questo caso l'ugello è posizionato su una struttura a portale, che può scorrere su due binari. Tutto il macchinario viene progettato per essere dispiegabile, in modo da facilitarne il trasporto⁶² (fig. 33).

Khoshnevis fonda la Contour Crafting Corporation⁶³, attualmente una delle aziende leader a livello mondiale nel settore della stampa 3D per le costruzioni.

L'estrusione di malte e miscele viscosi è oggi uno dei principali metodi di stampa adottato nel campo architettonico e prende il nome di *Liquid Deposition Modeling* (LDM): si contraddistingue dal *Fusion Deposition Modeling* perché il materiale usato è già allo stato fluido e non ha necessità di essere fuso prima di essere depositato dall'ugello. Pur essendo entrambi metodi di manifattura additiva per estrusione, la stampa 3D FDM e LDM hanno caratteristiche differenti, come si vedrà più avanti.

⁶⁰ Khoshnevis, B., *Additive Fabrication Apparatus and Method*, 1996, brevetto US5529471.

⁶¹ Khoshnevis, B., *Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies*, in *Automation in Construction*, n. 13, 2004, pp. 5-19.

⁶² Khoshnevis, B., *Deployable Contour Crafting*, 2007, brevetto WO 2007/050968.

⁶³ <https://www.contourcrafting.com/>

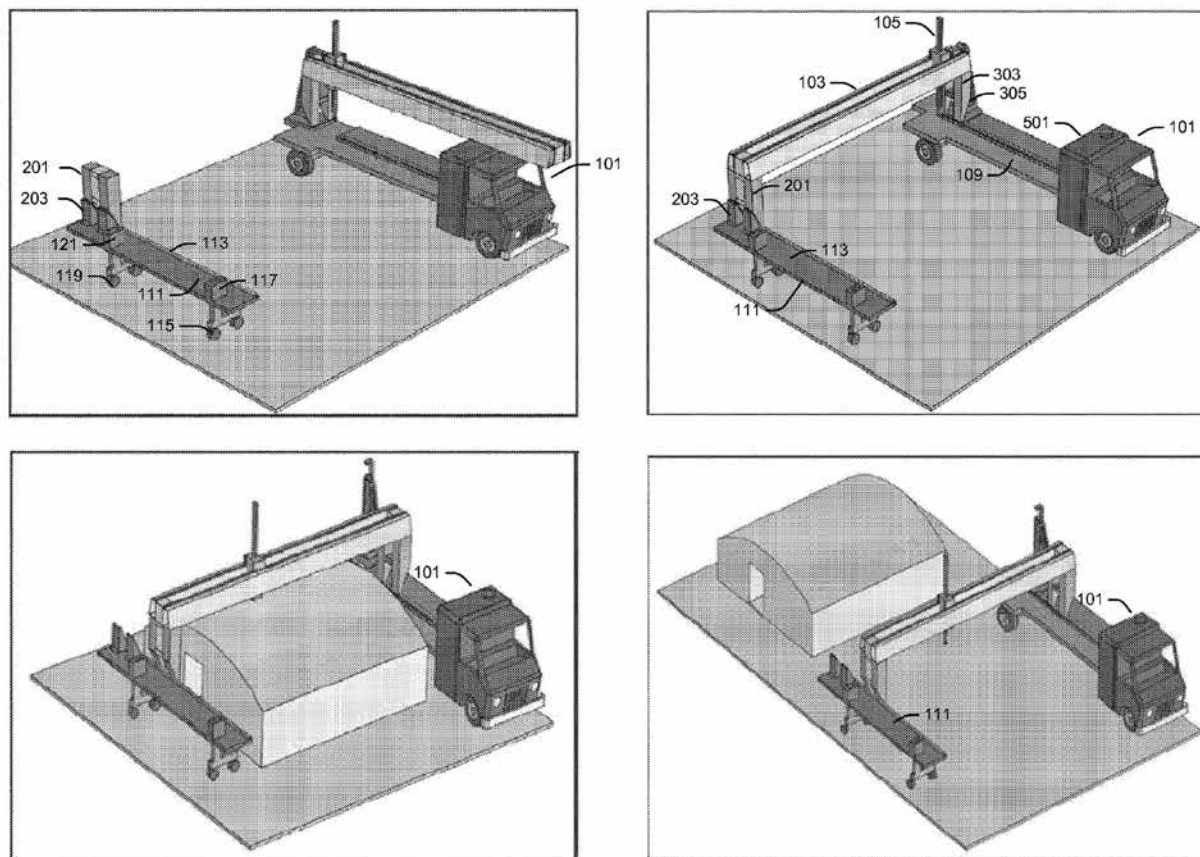


Fig. 33. Schemi del sistema Contour Crafting messo a punto da Khoshnevis.

In contemporanea alle sperimentazioni di Khoshnevis, anche Joseph Pegna, ricercatore presso il Rensselaer Polytechnic Institute di New York, mette a punto un metodo di fabbricazione additiva pensato apposta per il mondo delle costruzioni, in particolare per le strutture in muratura.

Differentemente dal metodo di stampa 3D per estrusione, che prevede che un ugello depositi la miscela fluida, la quale deve successivamente asciugarsi e solidificarsi, il metodo di Pegna prevede che venga depositato, per ogni *layer* in cui l'oggetto 3D è stato suddiviso, uno strato di polveri (inerte), su cui viene depositato un legante idraulico in maniera selettiva, seguendo la geometria della sezione dell'oggetto. Dopo che tutti gli strati sono stati completati, l'oggetto viene posto in una camera a vapore pressurizzato, per innescare la reazione idraulica.

I primi esperimenti di Pegna, su piccola scala, non prevedono un processo totalmente automatizzato, in cui il legante sia distribuito secondo la corretta geometria da un ugello, ma si procede attraverso delle maschere, forate con la sagoma prevista per i vari *layer* – si tratta di geometrie piuttosto semplici, che non prevedono tante sezioni differenti. In questo modo, tuttavia, è

stato possibile effettuare una valutazione preliminare di questa modalità di fabbricazione e verificare la buona tenuta del materiale^{64, 65}.

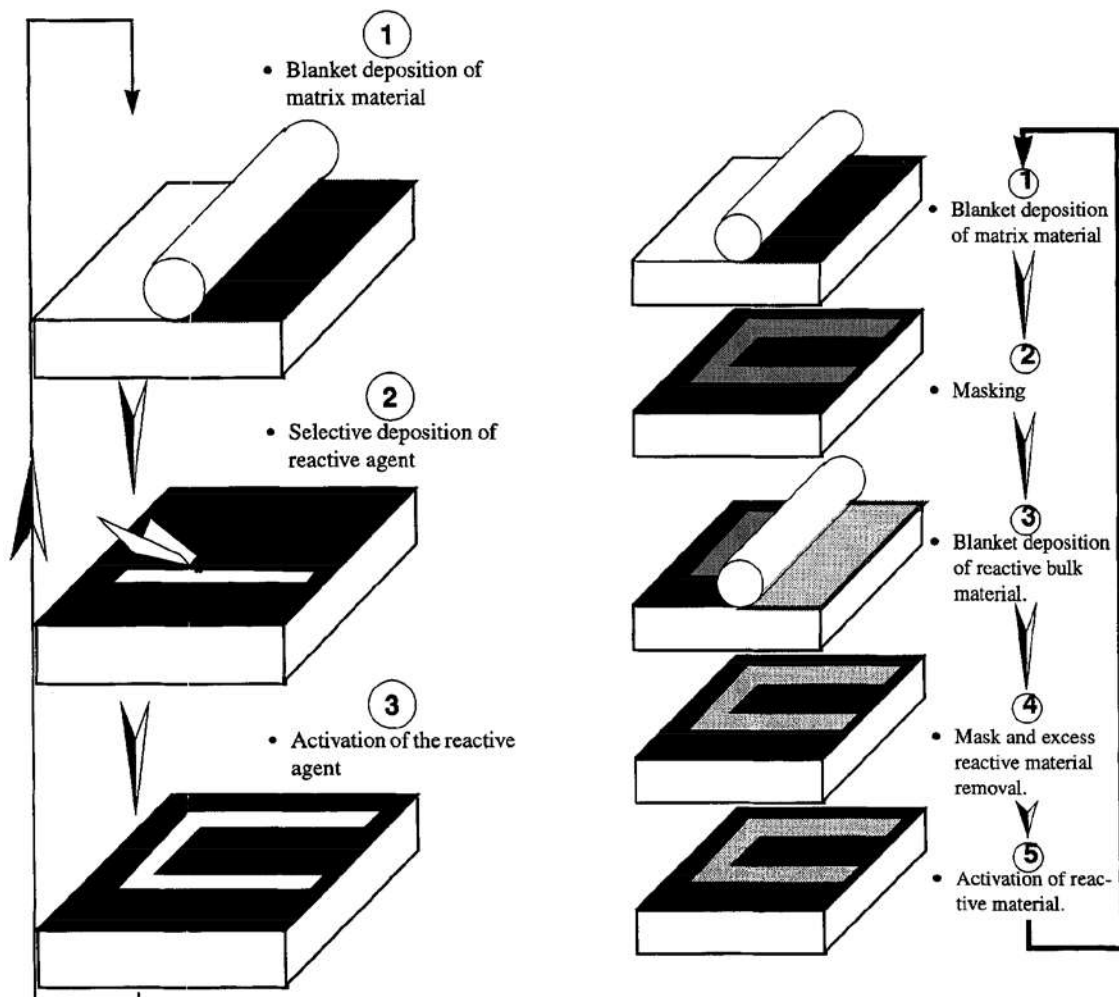
Poiché in questo caso è il legante a essere depositato, piuttosto che la malta allo stato fluido, questa modalità di fabbricazione additiva è conosciuta col nome di *binder jetting*.

Sullo stesso principio si basa la tecnologia D-Shape, sviluppata dall'ingegnere italiano Enrico Dini e brevettata nel 2007: egli mette a punto un macchinario pensato proprio per il settore delle costruzioni. Il principio di fabbricazione da lui descritto è simile a quello di Pegna e

⁶⁴ 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.

⁶⁵ Pegna, J. *Exploratory investigation of solid freeform construction*, in *Automation in Construction*, n. 5, 1997, pp. 427-437.

Fig. 34. Schema del sistema ideato da Pegna, che comprende sia una versione in cui il legante viene depositato in maniera selettiva sia una versione in cui esso viene depositato attraverso delle maschere (© Joseph Pegna).



consiste nelle seguenti fasi di lavorazione:

- 1) il modello CAD viene suddiviso in *layer* orizzontali tramite un apposito software di *slicing*⁶⁶;
- 2) sul piatto di stampa viene posto uno strato di inerte sotto forma di polvere;
- 3) un ugello, muovendosi nelle due direzioni x e y dello spazio, spruzza il legante allo stato liquido in maniera mirata, rispettando il perimetro delle sezioni individuate tramite lo *slicing*;
- 4) al completamento di ciascuno strato, l'ugello si muove lungo la direzione z e prosegue con il successivo.

Enrico Dini rende finalmente automatico questo processo di fabbricazione. Egli sottolinea come la macchina da lui messa a punto miri a ottimizzare la costruzione che, invece, con il metodo tradizionale del calcestruzzo gettato in opera, risente di alcuni svantaggi (la necessità di casseforme, la difficoltà nel creare geometrie complesse, la necessità di molta manodopera, i tempi di stagionatura elevati). Inoltre viene introdotta la possibilità di aggiungere materiali fibrosi nella miscela di inerti, in modo da migliorare la resistenza a trazione del manufatto finito⁶⁷.

Enrico Dini riesce, con la sua tecnologia, a realizzare oggetti di grandi dimensioni, come il Radiolaria Pavilion, che sarà descritto in seguito, e attualmente, oltre alla sua D-Shape⁶⁸, altre aziende hanno sviluppato la tecnologia *binder jetting*, che può essere applicata a numerose tipologie di materiali (polveri lapidee, calcestruzzo, legno, ecc.).

Per concludere, tutti i concetti affrontati in questo paragrafo possono

⁶⁶ Il termine inglese “to slice” significa letteralmente “affettare”. I software di *slicing* sono programmi impiegati per impostare la stampa 3D di un oggetto, suddividendo quest'ultimo in “fette”, che rappresentano i *layer* depositati dalla macchina. L'altezza di questi *layer*, e quindi la precisione con cui gli oggetti vengono realizzati, è uno dei parametri che si possono regolare per stabilire la qualità del prototipo.

⁶⁷ Dini, E., *Improved method for automatically producing a conglomerate structure*, 2009, brevetto EP 2 203 286 B1.

⁶⁸ <https://d-shape.com/>

essere sintetizzati come segue.

Il settore della costruzione è caratterizzato da un processo produttivo di tipo additivo, anche se tradizionalmente si contraddistingue per la necessità dell'utilizzo di casseforme e di ingenti risorse, anche in termini di forza lavoro. Per questo motivo sin dai primi decenni del secolo scorso si cerca di mettere a punto sistemi innovativi, che puntino alla semplificazione e al risparmio, tuttavia solo a partire dagli anni Novanta iniziano a emergere i primi processi automatizzati applicabili in campo architettonico, in seguito all'introduzione della fabbricazione additiva di piccola scala.

Fig. 35. La stampante
D-Shape di Enrico Dini
(© D-Shape, ESA).



Capitolo 4

La stampa 3D applicata all'architettura

Dopo aver commentato l'evoluzione storica della stampa 3D e la sua introduzione nel campo architettonico, nel seguente paragrafo se ne analizzerà l'attuale sviluppo, prendendo in esame le varie tecnologie e gli specifici campi di applicazione.

Si può esordire dicendo che l'*additive manufacturing* si sta diffondendo molto rapidamente nel settore costruttivo e sempre più aziende investono in questo tipo di tecnologia. Le ragioni di questo fenomeno sono da ricercarsi nei vantaggi che la stampa 3D porta rispetto ai metodi costruttivi tradizionali, come:

- tempi di produzione inferiori;
- riduzione della manodopera necessaria;
- possibilità di realizzare forme customizzate più o meno complesse senza la necessità di casseforme o stampi, con conseguente riduzione degli scarti di fabbricazione;
- possibilità di intervenire in luoghi difficilmente accessibili, con conseguente aumento della sicurezza sul lavoro⁶⁹.

In alcuni casi l'utilizzo della stampa 3D viene addirittura incoraggiato: basti pensare alla *Dubai 3D Printing Strategy*, con cui, nella città di Dubai, si sta tentando di incentivare l'uso della manifattura additiva in particolare nel settore edile, dato che «questa tecnologia ristrutturerà le economie e i mercati del lavoro perché l'uso di manodopera non specializzata diminuirà rispetto alla situazione attuale, soprattutto nel settore della costruzione. Ridefinirà anche la produttività perché il tempo richiesto per la stampa 3D di edifici sarà pari al 10% di quello impiegato con le tecniche tradizionali»⁷⁰. Per questo gli Emirati Arabi Uniti si sono posti l'obiettivo di avere il 25% degli edifici di Dubai realizzati tramite *additive manufacturing* entro il 2030. Attualmente le tecnologie più diffuse nel campo architettonico sono quella

⁶⁹ Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. C., Kim, J. R., *A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market, in Sustainability*, n. 12, 2020.

⁷⁰ Estratto del discorso di Sheikh Mohammed, emiro di Dubai, tenuto in occasione del lancio della Dubai 3D Printing Strategy, il 27 aprile 2016. Il testo è tratto dal sito della News Agency – Wam degli Emirati Arabi: <https://wam.ae/en/details/1395294773443>.

per estrusione di materiale e la tecnologia *binder jetting*.

Per quanto riguarda la stampa 3D per estrusione, si ricorda la suddivisione tra tecnologia LDM e FDM. La prima consente l'utilizzo di materiali da costruzione veri e propri (argilla e malte), richiede tempi di fabbricazioni piuttosto brevi, ma è limitante dal punto di vista geometrico: i materiali fluidi, una volta essiccati, diventano fragili e la rimozione di eventuali supporti porterebbe a lesioni. Per questa ragione non consentono l'uso di supporti e ciò, aggiunto al fatto che il materiale estruso non si solidifica subito, comporta varie limitazioni dal punto di vista formale, in particolare per quanto riguarda sbalzi e cavità.

La stampa 3D FDM, invece, garantisce più libertà dal punto di vista geometrico e può raggiungere livelli di precisione più elevati rispetto alla LDM – possono essere utilizzati ugelli molto piccoli – ma richiede tempi di fabbricazione più lunghi. Inoltre le tecnologie più semplici ed economiche supportano l'estrusione di vari tipi di plastica, che non è un materiale adatto al settore della costruzione, fatta eccezione per padiglioni temporanei e installazioni, di cui si vedranno alcuni esempi.

La stampa 3D *binder jetting*, invece, si contraddistingue per la vasta gamma di materiali supportati: le polveri di inerte, infatti, possono essere di tanti tipi (pietra, sabbia, legno, ceramica, metalli, ecc.).

Questa tecnologia richiede tempi di fabbricazione abbastanza brevi e consente di ottenere forme molto più complesse rispetto alla stampa 3D per estrusione perché la polvere accumulata strato dopo strato funge da sostegno per la struttura e, permettendo di stampare sbalzi e cavità senza l'ausilio di supporti. Tuttavia il livello di risoluzione raggiungibile è piuttosto bassa e spesso l'oggetto finito risulta poroso e dotato di una scarsa resistenza⁷¹.

Le caratteristiche di queste tre modalità di fabbricazione additiva sono riassunte nella tabella 1.

Oltre che per la modalità di fabbricazione utilizzata, le stampanti 3D si contraddistinguono anche per il tipo di meccanica. Ne esistono tre tipi fondamentali:

1) meccanica cartesiana: è quella più diffusa e prevede il movimento

⁷¹ Xometry, *Binder Jetting vs. Material Jetting 3D Printing What's the Difference?*, 30/09/2023, <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/binder-jetting-vs-material-jetting/>

Tabella 1. Vantaggi e svantaggi dei vari tipi di stampa 3D

Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
Stampa 3D LDM	• Compatibile con materiali da costruzione (malte cementizie, argilla, malte geopolimeriche, ecc.). • Tempi di produzione ridotti. • Disponibilità di macchinari alla scala architettonica.	• Forti limiti dal punto di vista formale. • Necessità di tempi di asciugatura più o meno lunghi. • Precisione limitata.
Stampa 3D FDM	• Possibilità di avere un'elevata precisione in fase di stampa. • Buona libertà formale grazie all'ausilio dei supporti in fase di stampa.	• Non compatibile con materiali da costruzione. • Tempi di fabbricazione elevati. • Esistono stampanti di grandi dimensioni ma non alla scala architettonica.
Stampa 3D binder jetting	• Grandissima varietà di materiali disponibili. • Possibilità di realizzare geometrie estremamente complesse grazie al sostegno del letto di polvere.	• Scarsa resistenza meccanica del materiale stampato. • Precisione limitata. • Esistono stampanti di grandi dimensioni ma non alla scala architettonica

dell'ugello all'interno del volume di stampa lungo i tre assi cartesiani x, y e z;

- 2) meccanica delta: le macchine che funzionano secondo questa meccanica si sviluppano in altezza e presentano un impianto triangolare. L'ugello è collegato a tre bracci che scorrono su tre guide verticali. A seconda dello spostamento di ciascuno dei tre bracci sulla corrispondente guida, l'ugello può raggiungere le varie coordinate dello spazio cartesiano;
- 3) meccanica polare: è la meno diffusa e prevede la rotazione del piatto di stampa piuttosto che il movimento dell'ugello in maniera lineare. Le coordinate dei vari punti, in questo caso, non sono date da valori di x, y e z, ma da un angolo e una distanza.

In alcune applicazioni complesse, tuttavia, è possibile adottare l'uso di bracci robotici e robot mobili, i quali, equipaggiati con un ugello e un serbatoio di materiale, garantiscono una notevole libertà di movimento.



Figg. 36-37. Modello in PLA stampato con tecnologia FDM.



Figg. 38-39 (al centro). Vaso in ceramica stampato con tecnologia LDM.



Figg. 40-41. Modello in scala di TechnoVault, progettato da Dustin White e stampato dall'azienda Concr3de con tecnologia *binder jetting* usando polveri di pietra leccese. Il modello è stato esposto presso la mostra *Marmomac Meets Academies 2023* (© Gaz Blanco).

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura

a



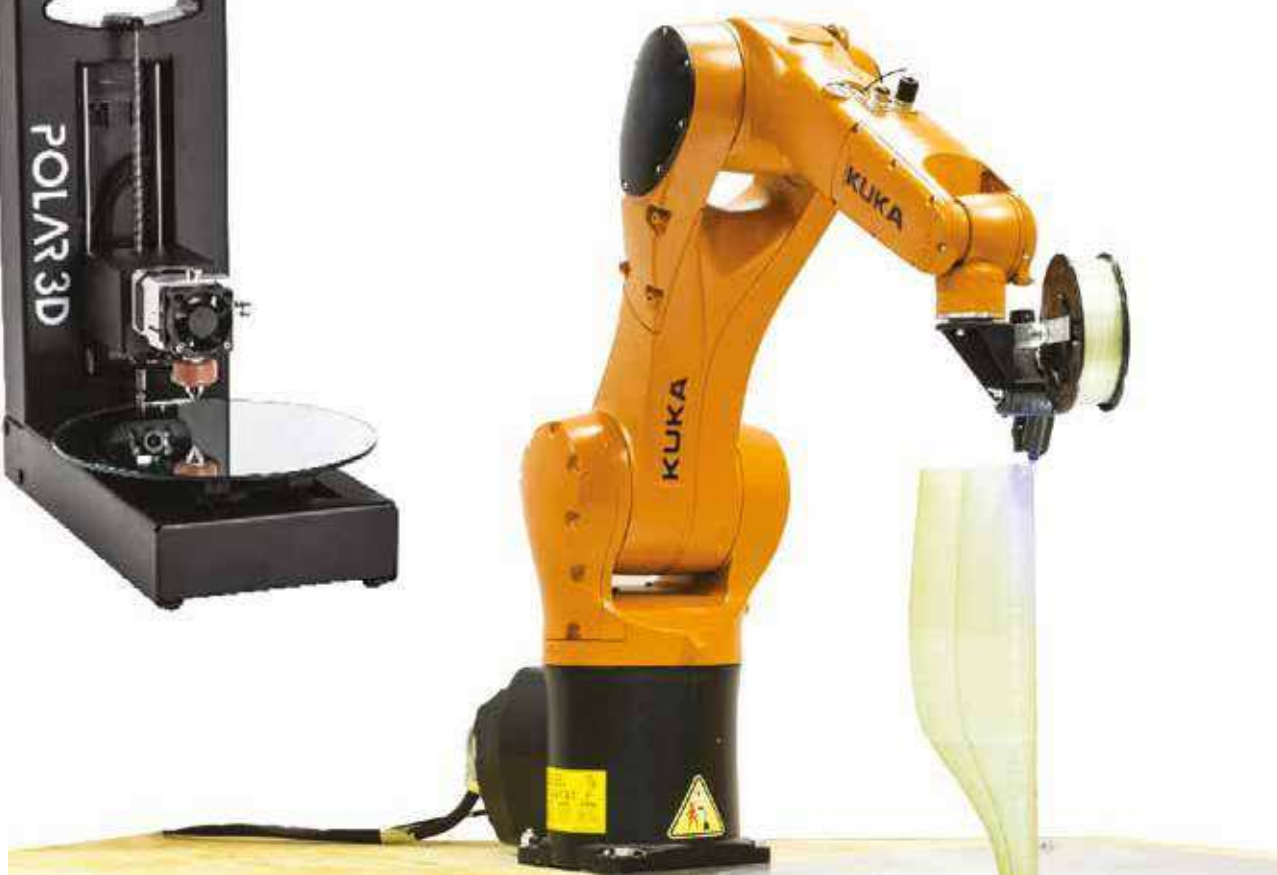
b



c



d



A prescindere dal tipo di tecnologia usata, la stampa 3D in ambito architettonico può essere applicata in due modi, ossia attraverso una prototipazione di tipo monolitico e una prototipazione di tipo discretizzato. Entrambe le modalità presentano vantaggi e svantaggi.

La fabbricazione additiva monolitica si serve di macchine di notevoli dimensioni ed è certamente vantaggiosa se si considerano i tempi di esecuzione, poiché permette di ottenere rapidamente il prodotto finito per intero. Tali macchinari sono dotati di ugelli di grandi dimensioni – che consentono di estrarre malte cementizie o altre miscele adatte alla costruzione – i quali garantiscono la rapidità di realizzazione di oggetti in grande scala, ma causano una riduzione della precisione e del controllo degli stessi. L'impossibilità di utilizzare supporti – i quali non potrebbero essere rimossi – limita anche notevolmente la complessità delle geometrie ottenibili.

La fabbricazione additiva discretizzata, invece, permette di utilizzare stampanti di dimensioni ridotte ed è vantaggiosa innanzitutto dal punto di vista del controllo del processo di fabbricazione: i singoli componenti possono essere realizzati con un livello di precisione molto più elevato e un eventuale errore di stampa inficia solo sul singolo componente, senza compromettere l'intera struttura, limitando lo spreco di materiale e di risorse. Inoltre la stampa 3D per elementi discreti offre la possibilità di realizzare strutture complesse dal punto di vista formale – poiché esse vengono suddivise in elementi più semplici – e di realizzare i vari blocchi in materiali differenti, consentendone la combinazione.

A fronte di questi vantaggi, tuttavia, la fabbricazione additiva discretizzata rende necessario un processo di assemblaggio il cui livello di difficoltà è strettamente legato alla geometria finale del prodotto: ciò inficia sia il processo di produzione sia i tempi di esecuzione.

Entrambe queste modalità di fabbricazione sono oggi indagate e trovano applicazione in differenti ambiti dell'architettura.

Fig. 42 (alla pagina precedente). Varie tipologie di stampanti 3D:

- a) stampante Ultimaker con meccanica cartesiana;
- b) stampante WASP con meccanica delta;
- c) stampante Polar3D con meccanica polare;
- d) braccio robotico.

4.1. La stampa 3D per l'edilizia

I maggiori progressi nel campo dell'edilizia si stanno effettuando attraverso l'applicazione della fabbricazione additiva di tipo monolitico, impiegando macchinari di grandi dimensioni: con le stampanti *crane*⁷² o con bracci robotici specifici è possibile stampare *in situ* tutti gli elementi strutturali verticali di un edificio.

Solitamente la prototipazione avviene utilizzando malte cementizie, anche se, come si è già accennato, si stanno conducendo sperimentazioni per l'uso di materiali innovativi – come le malte geopolimeriche – o naturali – come la terra cruda.

L'avvento dell'*additive manufacturing* alla scala architettonica rappresenta un fenomeno piuttosto complesso, poiché porta con sé una serie di implicazioni da non sottovalutare.

Si sono già menzionati alcuni benefici per cui questo tipo di lavorazione sta riscuotendo sempre più successo, tra cui la riduzione di materiali di scarto con un consistente abbattimento dei costi – si stima che le casseforme necessarie per la costruzione tradizionale influenzino in maniera significativa il tempo di fabbricazione e il loro costo varia dal 25% al 35% del costo totale dell'opera⁷³.

Tuttavia è doveroso rilevare anche altri aspetti, primo fra tutti il cambiamento che gradualmente verrà portato nel settore delle costruzioni.

Innanzitutto muteranno le figure professionali richieste: la stampa 3D permette di ridurre il quantitativo di manodopera non specializzata ma, allo stesso tempo, necessita di nuove figure in grado di controllare la tecnologia, per le quali è necessario investire in *training* adatti.

Non è secondaria, inoltre, l'implementazione dell'*additive manufacturing* nel processo costruttivo, poiché i macchinari di grandi dimensioni sono molto costosi e richiedono, dunque, un investimento iniziale consistente, non

⁷² Le stampanti *crane* sono stampanti che permettono di stampare oggetti monolitici alla scala architettonica (la parola *crane* significa gru). Come si vedrà più avanti, esistono di diversi tipi.

⁷³ Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., Nather, M., Otto, J., Krause, M., *Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing*, in *Automation in Construction*, n. 107, 2019.

sempre conveniente nel caso di piccole e medie imprese^{74, 75}.

Bisogna sottolineare come ancora non esista un processo per realizzare interamente un edificio monolitico tramite fabbricazione additiva per via delle limitazioni della stampa LDM di cui si è già parlato. L'impossibilità di ottenere sbalzi significativi e di utilizzare supporti fa sì che allo stato attuale la maggior parte delle soluzioni costruttive prevedano strutture ibride, in cui i muri vengono stampati, mentre i solai sono realizzati in altro materiale – per esempio in legno – e aggiunti a posteriori.

Infine, non esiste ancora una legislazione che permetta di normare gli edifici stampati in 3D in maniera sistematica e questo rappresenta un ostacolo alla sua sistematica applicazione⁷⁶.

Attualmente svariate aziende si occupano della stampa 3D applicata alla costruzione.

Innanzitutto si può citare la Contour Crafting Corporation, azienda californiana fondata da Behrokh Koshevnis, la quale sfrutta il già citato sistema costituito da un robot a forma di portale che scorre su dei binari. Su di esso può spostarsi l'ugello.

Oggi la Contour Crafting Corporation ha l'obiettivo di rivoluzionare il settore delle costruzioni attraverso la sua tecnologia innovativa sia per quanto riguarda l'edilizia abitativa terrestre sia per quanto riguarda possibili habitat spaziali, che possono essere stampati tramite robot mobili con una miscela a base di regolite extraterrestre, secondo il principio della *In Situ Resource Utilization*. Anche il sistema costruttivo sta venendo ulteriormente sviluppato per poter realizzare edifici di dimensioni maggiori, come complessi plurifamiliari.

Un'altra azienda importante, che sfrutta stampanti di tipo *crane* a portale è ICON⁷⁷, che si contraddistingue per aver ottenuto nel 2018 il primo permesso di costruire per abitazioni stampate in 3D e che tuttora sta portando avanti progetti per i primi quartieri residenziali di case prodotte

⁷⁴ Subrin, K, Breessac, T., Garnier, S., Ambiehl, A., Paquet, E., Furet, B., *Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing*, in *IFAC Papers Online*, vol. 51, issue 11, 2018, pp. 716-721.

⁷⁵ Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. C., Kim, J. R., op. cit.

⁷⁶ Ibid.

⁷⁷ <https://www.iconbuild.com/>

tramite *additive manufacturing*.

La tecnologia ICON è simile a quella della Contour Crafting e prevede l'uso di una stampante *crane* a portale, con cui l'azienda si impegna attivamente nell'ambito del *social housing*. Con questo termine ci si riferisce a quelle pratiche di edilizia residenziale che sono rivolte alle fasce di popolazione più deboli, che difficilmente posso permettersi un'abitazione sul libero mercato. Nello specifico ICON ha collaborato con associazioni non-profit per la realizzazione di unità abitative destinate ai senzatetto: per esempio insieme all'associazione New Story ha iniziato nel 2019 a Tabasco (Messico) la realizzazione di un quartiere di abitazioni per le fasce più povere di popolazione, mentre insieme a Mobile Loaves & Fishes – un'altra associazione – ha realizzato nel 2020 ad Austin alcune unità abitative per il *Community First! Village*, un progetto per fornire un alloggio a persone senza fissa dimora.

La stampa 3D si presta facilmente all'edilizia popolare proprio per l'abbattimento dei costi che riesce a procurare – escludendo l'investimento iniziale per i macchinari.

Così come la Contour Crafting Corporation, anche ICON è impegnata nella “corsa allo spazio” e porta avanti progetti e ricerche riguardanti la *space architecture*: grazie a un finanziamento della NASA e in collaborazione con SEArch+ (Space Exploration Architecture) nel 2020 ha sviluppato il progetto per un habitat lunare, mentre nel 2021 ha realizzato *Mars Dune Alpha*, il prototipo di un possibile habitat marziano, progettato dallo studio BIG (Bjarke Ingels Group) e destinato a uno studio della NASA per simulare una missione su Marte in un sito terrestre analogo⁷⁸.

La possibilità di costruire in ambienti estremi come lo spazio, grazie al fatto che il processo di stampa è per buona parte un processo automatizzato, apre le porte anche all'edificazione in ambienti terrestri estremi, dove la costruzione per mezzo di manodopera risulterebbe molto più difficoltosa. Apis Cor⁷⁹, un'altra azienda che si occupa di stampa 3D in calcestruzzo per la realizzazione di edifici, ha, infatti, costruito una piccola unità abitativa vicino Mosca – completata in un solo giorno – e un edificio per uffici nell'area desertica di Dubai: si tratta rispettivamente di un ambiente di

Fig. 43 (alla pagina seguente, in alto). Immagine renderizzata dell'attuale sistema Contour Crafting (© Contour Crafting Corporation).

Fig. 44 (alla pagina seguente, in basso). Immagine renderizzata della stampante Vulcan messa a punto da ICON (© ICON).

⁷⁸ Un sito terrestre analogo è un sito avente condizioni climatiche e ambientali molto simili a uno specifico ambiente extraterrestre, in questo caso quello marziano.

⁷⁹ <https://apis-cor.com/>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVI ciclo, Novembre 2020 - Gennaio 2024
Curriculum: Costruzione



freddo estremo e di caldo estremo.

Significativo è anche l'impegno di Apis Cor nello sviluppo, in collaborazione con l'azienda russo-italiana Renca, di una malta geopolimerica stampabile che, oltre ad essere eco-friendly, presenti anche caratteristiche più adatte a luoghi con climi molto freddi⁸⁰.

Differentemente dalla Contour Crafting Corporation e da ICON, Apis Cor utilizza bracci robotici piuttosto che stampanti *crane* a portale (fig. NN) e ha anche messo a punto un suo sistema per fabbricare pareti verticali lisce, prive di una "layerizzazione" accentuata, per prevenire l'accumulo di sporcizia e batteri, sfruttando delle piastre metalliche disposte lateralmente rispetto all'ugello, in maniera simile al metodo messo a punto da Koshnevis. I bracci robotici di Apis Cor ruotano intorno a un perno centrale, in modo analogo alle macchine analogiche messe a punto all'inizio del secolo scorso, tuttavia essi sono in grado anche di spostarsi su ruote, così da fornire una maggiore libertà a livello planimetrico.

L'azienda danese COBOD⁸¹ si occupa sempre di stampa 3D in calcestruzzo e utilizza, ancora una volta, stampanti *crane* sviluppate dalla stessa azienda. Tuttavia le dimensioni del suo sistema BOD2 permettono di arrivare a stampare edifici di due piani.

Infine è doveroso citare WASP (World Advanced Saving Project)⁸², un'azienda italiana che si distingue per le sperimentazioni legate alla costruzione in terra cruda con lo scopo di trovare soluzioni per la realizzazione di abitazioni a basso costo, sfruttando il più possibile materiali a chilometro zero. Per le costruzioni alla scala architettonica WASP ha messo a punto la propria macchina, una stampante *crane* con meccanica polare – differentemente dalle stampanti di Contour Crafting e ICON, che, invece, lavorano con la meccanica cartesiana. La crane WASP è stata progettata per lavorare anche in modo collaborativo: più stampanti possono essere aggregate secondo moduli esagonali e costituire i diversi componenti di un sistema più complesso.

Il primo dimostratore è stato il modulo denominato *Gaia*, realizzato nel

Fig. 45 (alla pagina
seguente, in alto). Frank,
il braccio robotico
mobile messo a punto da
Apis Cor (© Apis Cor).

Fig. 46 (alla pagina
seguente, in basso).
Stampante *crane* COBOD
(© COBOD).

⁸⁰ Anusci, V., «Russian startup Renca launches géobeton geocement for 3D printing construction», *VoxelMatters*, 25 marzo 2017, <https://www.voxelmatters.com/russian-startup-renca-launches-geobeton-geocement-3d-printing-construction-applications/>.

⁸¹ <https://cobod.com/>

⁸² <https://www.3dwasp.com/>

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVI ciclo, Novembre 2020 - Gennaio 2024
Curriculum: Costruzione

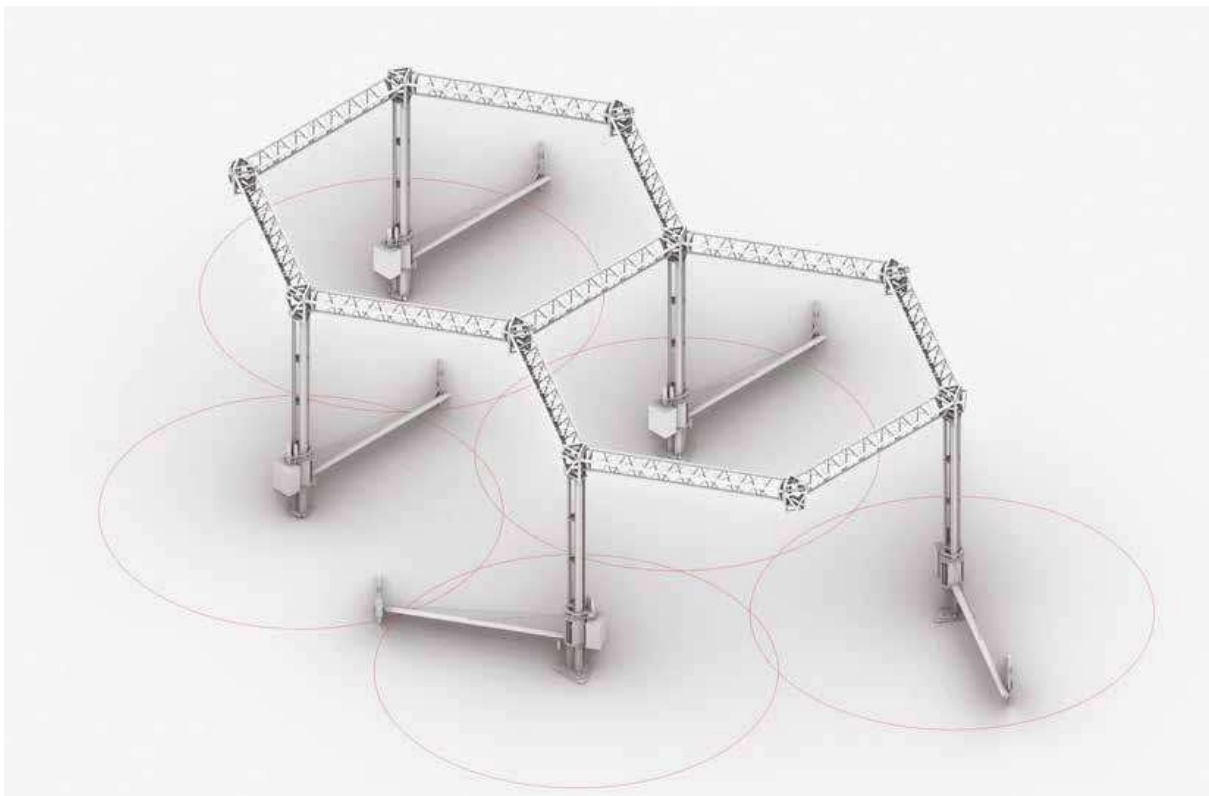


Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura



2018 in terra, paglia di riso e lolla di riso. Tra il 2020 e il 2021, invece, grazie a una collaborazione con lo studio Mario Cucinella Architects, è stato realizzato TECLA, un prototipo di unità abitativa dalla pianta organica, che dimostra la grande flessibilità della stampa 3D in ambito costruttivo anche per via della trama tridimensionale con cui sono trattate le pareti. Differentemente dagli altri casi studio citati, TECLA non presenta pareti totalmente verticali, ma si configura come uno spazio voltato caratterizzato da grandi oculi in sommità.

La presenza degli oculi è dettata dall'impossibilità di chiudere totalmente la struttura per mezzo di *layer* orizzontali e senza supporti, ed è proprio questo il limite più grande della fabbricazione additiva monolitica: a fronte di una grandissima libertà dell'assetto planimetrico, non si ha una uguale libertà dello sviluppo in alzato.

Con alcune ricerche si sta indagando la possibilità di realizzare spazi voltati interamente chiusi sfruttando la combinazione di *layer* con differenti giaciture, tuttavia ciò implica l'uso di macchine e processi di fabbricazione molto più complessi⁸³.

Oltre alla costruzione *in situ* esistono anche alcuni esempi, seppur in quantità molto minore, di opere costruite tramite grandi componenti successivamente assemblati, come nel caso di Office of the Future di Killa Design e Gensler o di Serendix Sphere di Clouds Architecture Office e Serendix.

Di seguito si riportano i progetti ritenuti più significativi per quanto riguarda la fabbricazione additiva nel campo dell'edilizia. Essi ne mostrano gli sviluppi e l'attuale stato di avanzamento. Si sono catalogati non solo esempi di edilizia terrestre, ma anche di progetti legati alla *space architecture*.

⁸³ 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.

Figg. 47-48 (alla pagina precedente). Fotografia della stampante crane WASP e schema di aggregazione di più moduli (© WASP).

Tabella 2. Edilizia terrestre

		 
	© Marco Ferreri	© WinSun New Materials
Progetto	UnaCasaTuttaDiUnPezzo	Dieci prototipi di casa
Progettisti e aziende coinvolte	Marco Ferreri, Dinitech Spa	WinSun Decoration Design Engineering Co.
Luogo	Milano	Shangai (Cina)
Anno	2010	2014
Materiale di stampa	Sabbia miscelata a legante ecocompatibile	Calcestruzzo a base di materiali da costruzione riciclati e fibra di vetro
Tecnologia di stampa	Binder Jetting (D-Shape)	Estrusione (stampante <i>crane</i> Winsun)
Descrizione	Si tratta di un piccolo prototipo di casa monolitica, concepita come abitazione minimale adatta a situazioni emergenziali. Essa misura 2,4 m × 4 m × 3,5 m e comprende al suo interno tutte le attrezzature minime per garantire la sopravvivenza (cucina, bagno, letto). La stampa è avvenuta in un'unica soluzione e ha richiesto circa quattordici giorni lavorativi per il completamento. Il prototipo è stato esposto al Triennale Design Museum di Milano. La compagnia cinese WinSun Decoration Design Engineering ha realizzato dieci prototipi di piccole case impiegando 24 ore di stampa. Le strutture non sono state costruite <i>in situ</i>: maxi-blocchi sono stati stampati separatamente con una stampante avente un volume di stampa pari a 32 m × 10 m × 6,6 m; successivamente sono stati trasportati e assemblati sul posto. Ciascuna unità ha un costo di circa \$ 4800.	



© 3ders.org



© WAM /Nedal Machou /Tommaso Calistri

Progetto	Appartamento di cinque piani e villa a due piani	Office of the future
Progettisti e aziende coinvolte	WinSun Decoration Design Engineering Co.	Killa Design, Gensler
Luogo	Suzhou (Cina)	Dubai (Emirati Arabi Uniti)
Anno	2015	2016
Materiale di stampa	Calcestruzzo a base di materiali da costruzione riciclati, fibra di vetro e acciaio	Calcestruzzo
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante <i>crane</i> Winsun)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	Si tratta di due edifici sperimentali realizzati da WinSun Decoration Design Engineering Co. ed esposti insieme presso il Suzhu Industrial Park. Sono stati realizzati entrambi attraverso maxi-blocchi stampati e successivamente trasportati e assemblati in situ. Si tratta di due dimostratori volti a mostrare le potenzialità della stampa 3D, i quali però non sono ancora qualificabili da un punto di vista normativo.	Questo complesso di piccoli edifici è stato realizzato grazie agli incentivi della <i>Dubai 3D Printing Strategy</i> . La stampa, che è stata effettuata per mezzo di bracci robotici, non è avvenuta <i>in situ</i> . Il processo di fabbricazione è durato diciassette giorni, mentre l'assemblaggio a Dubai ha richiesto due giorni.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura



© Apis-Cor



© Massimiliano Locatelli



© Henrik Blomquist

Progetto	3D-printed house in Stupino	3D Housing 05
Progettisti e aziende coinvolte	Apis Cor, PIK	Massimiliano Locatelli – CLS Architetti, Italcementi, Arupgroup, Cybe
Luogo	Stupino (Russia)	Milano
Anno	2017	2018
Materiale di stampa	Malta geopolimerica	Calcestruzzo
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico)	Estrusione (braccio robotico Cybe)
Descrizione	È una piccola unità abitativa di 37 mq, con le pareti perimetrali curve. La stampa delle murature ha richiesto all'incirca 24 ore di fabbricazione. Il prototipo è stato successivamente stuccato e sono state aggiunte le finiture, come gli infissi e il tetto. Quest'ultimo, nonostante sia piano, è stato studiato appositamente per il sito di costruzione, poiché è in grado di sopportare il carico neve. Si tratta di un prototipo di casa di 100 mq, presentata in occasione della Milano Design Week 2018 e stampata il loco, in Piazza Cesare Beccaria. La struttura presenta una configurazione planimetrica libera – favorita dall'uso della stampa 3D – ed è composta da quattro ambienti distinti: la zona living, la cucina, la zona notte e i servizi igienici. Inoltre, la casa presenta una terrazza verde.	

	  © WASP	  © Apis-Cor
Progetto	Gaia	Dubai Municipality
Progettisti e aziende coinvolte	WASP, RiceHouse	Apis Cor
Luogo	Massa Lombarda (Italia)	Dubai (Emirati Arabi Uniti)
Anno	2018	2019
Materiale di stampa	Miscela a base di terra cruda, paglia di riso, lolla di riso e calce	Malta cementizia a base di gesso
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante Crane Wasp)	Estrusione (braccio robotico Apis Cor)
Descrizione	È il primo modulo stampato in 3D utilizzando la terra cruda. La configurazione della struttura è stata concepita in modo da garantirne la sostenibilità: non solo la miscela stampata è costituita di materiali naturali e a chilometro zero, ma la struttura è anche studiata per garantire una temperatura interna sempre ottimale, in modo da rendere superfluo l'uso di impianti di riscaldamento e raffrescamento.	È l'edificio stampato in 3D più grande del mondo: copre una superficie di 640 mq e un'altezza di 9,5 m. La struttura è stata rinforzata con quattro pilastri armati. La stampa è avvenuta utilizzando tre bracci robotici messi a punto da Apis Cor e una miscela a base di gesso sviluppata appositamente dall'azienda e prodotta <i>in situ</i>. Le strutture orizzontali e le finiture sono state realizzate a posteriori, una volta ultimata la stampa delle pareti verticali.



© Alejandro Cegarra for The New York Times



© ICON



© ICON

Progetto	3D-printed Homes in Nacajuca	Community First! Village
Progettisti e aziende coinvolte	ICON, New Story	Mobile Loaves & Fishes, ICON
Luogo	Tabasco (Messico)	Austin (Texas, USA)
Anno	2019	2019
Materiale di stampa	Calcestruzzo	Calcestruzzo
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante <i>crane</i> ICON)	Estrusione (stampante <i>crane</i> ICON)
Descrizione	Si tratta di una comunità di piccoli edifici residenziali sviluppati per persone e famiglie in condizioni di estrema povertà. Il progetto è stato sviluppato da ICON per l'associazione non-profit New Story. Ogni casa copre una superficie di 500 mq, è stata stampata in circa 24 ore nette e, trovandosi in una zona sismica, è stata concepita secondo elevati standard di sicurezza. ICON in collaborazione con l'associazione non-profit Mobile Loaves & Fishes, che si occupa di assistenza per persone senza fissa dimora, ha realizzato un gruppo di sei edifici residenziali di 400 mq ciascuno. Le sei abitazioni fanno parte del Community First! Village, un progetto di Mobile Loaves & Fishes per dare una casa ai senzatetto di Austin.	

	  © Kamp C, Jasmien Smets	  © Iago Corazza
Progetto	KIEM	TECLA
Progettisti e aziende coinvolte	Kamp C, Thomas More, Vicre, Weber, Beneens, Etib / Concrete House and Trias Architects	Mario Cucinella Architects, WASP
Luogo	Westerlo (Belgio)	Massa Lombarda (Italia)
Anno	2020	2021
Materiale di stampa	Calcestruzzo	Miscela a base di terra cruda, paglia di riso, lolla di riso e calce
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante <i>crane</i> BOD2 di COBOD)	Estrusione (stampante Crane Wasp)
Descrizione	Si tratta del primo edificio a due piani stampato in 3D in Europa. Differentemente dagli esempi multipiano cinesi, questo è monolitico ed è stato realizzato in situ. Il completamento della stampa ha richiesto tre settimane. L'edificio copre una superficie di circa 90 mq ed è alto 8 m. La struttura è stata completata con un tetto ligneo, è stata dotata di impianti di riscaldamento a soffitto e a pavimento e la facciata è stata rivestita con pannelli solari. La realizzazione del prototipo è stata resa possibile dal progetto europeo C3PO, che mira a incentivare la tecnologia di stampa 3D in Belgio. La struttura di TECLA non consiste in una semplice estrusione verticale, ma in uno spazio voltato. La forma generale è ispirata alle pratiche costruttive vernacolari: le venature sulla superficie esterna – cave all'interno –, oltre ad aumentare la massa termica, favoriscono la circolazione dell'aria, mentre l'apertura in sommità favorisce l'effetto camino. Si tratta di buone pratiche per il raffrescamento passivo, che, insieme ad altre considerazioni bioclimatiche, contribuiscono a rendere TECLA un modello per future abitazioni ecologiche.	



© Xu Weiguo's team



© PERI

Progetto	3D Printed Concrete Book Cabin	3D printed house
Progettisti e aziende coinvolte	Team del prof. Xu Weiguo della Tsinghua University	Mense Korte Architekten, HeidelbergCement AG, PERI, Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat, Technische Universität München
Luogo	Shanghai (Cina)	Beckum (Germania)
Anno	2021	2021
Materiale di stampa	Calcestruzzo additivato con fibre	Calcestruzzo
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico)	Estrusione (stampante <i>crane</i> BOD2 di COBOD)
Descrizione	È un piccolo modulo di 30 mq, adatto a ospitare circa quindici persone. Il design è partito da schizzi concettuali, che poi sono stati tradotti in un modello 3D realizzato con il software Maya. Le pareti sono state stampate cave per essere riempite di materiale isolante. Similmente a TECLA, questo piccolo edificio presenta una forma organica con apertura superiore e la superficie della parete vicino all'ingresso è stata trattata con un pattern parametrico, che dimostra ulteriormente le possibilità formali non convenzionali ottenibili grazie all'AM. Si tratta di una casa unifamiliare su due livelli realizzata in Germania. La struttura è stata stampata in un'unica soluzione. In questo caso è stato possibile realizzare parti aggettanti con l'ausilio di strutture di supporto rimovibili in fase di stampa.	



© Abitare



© Serendix

Progetto	Maison Dior	Serendix Sphere
Progettisti e aziende coinvolte	WASP, Dior	Clouds Architecture Office, Serendix
Luogo	Dubai (Emirati Arabi Uniti)	Komaki, Aichi (Giappone)
Anno	2021	2022
Materiale di stampa	Malta a base di argilla, sabbia e fibre naturali	Calcestruzzo
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante Crane Wasp)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	È un altro esempio delle potenzialità delle malte a base di materiali naturali. WASP ha realizzato a Dubai per Dior questo concept store temporaneo costituito da due padiglioni cilindrici. Le superfici esterne sono state trattate con una trama parametrica. Sphere è un modulo messo a punto dallo studio Clouds Architecture Office e dall'azienda Serendix per essere realizzato in meno di 24 ore. Esso si distingue dagli altri prototipi finora descritti perché non è stampato in modo monolitico, ma suddiviso in maxi-blocchi, che vengono stampati separatamente e poi assemblati tramite gru. Per questo motivo è possibile chiudere totalmente la struttura usando parti stampate piuttosto che adottare una soluzione ibrida.	

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura



© Casey Dunn



© VoxelMatters

Progetto	House Zero	3D printed tiny house
Progettisti e aziende coinvolte	Lake Flato Architects, ICON	Mense-Korte Arkitekten, Röser GmbH, MC-Bauchemie, COBOD
Luogo	Austin (Texas, USA)	Beckum (Germania)
Anno	2022	2023
Materiale di stampa	Lavacrete (malta cementizia sviluppata da ICON)	Malta geopolimerica
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante <i>crane</i> ICON)	Estrusione (stampante <i>crane</i> BOD2 di COBOD)
Descrizione	È un modello di residenza progettata come edificio NZEB (Net-Zero Energy Building), ossia come edificio caratterizzato da un bilancio energetico quasi pari a zero. Il materiale usato per la stampa – che riguarda solo le murature – è il Lavacrete, un composto cementizio messo a punto da ICON per garantire un'alta compatibilità con le stampanti ed elevate prestazioni statiche. House Zero costituisce anche un esempio significativo della libertà formale che si può ottenere dal punto di vista planimetrico utilizzando la stampa 3D. Si tratta di un prototipo realizzato in maxi-blocchi – non realizzati <i>in situ</i> – assemblati tramite gru. La novità è rappresentata dall'uso di malte geopolimeriche invece di malte cementizie tradizionali. Questo rende il progetto più indirizzato a un approccio green, poiché i geopolimeri prevedono il reimpiego di scarti fabbricazione come le ceneri volanti. Inoltre per questo piccolo dimostratore anche il solaio è stato realizzato tramite AM e successivamente assemblato.	



Fig. 49. Interno di
TECLA (© Iago
Corazza).

Tabella 3. Space architecture

	 © Contour Crafting	 © Foster + Partners
Progetto	Lunar Contour Crafting	Lunar Habitation
Progettisti e aziende coinvolte	Contour Crafting Corporation, NASA	Foster + Partners, European Space Agency (ESA), Alta SpA, Scuola Superiore Sant'Anna, D-Shape
Luogo	Luna	Luna
Anno	2005 – in corso	2013
Materiale di stampa	Regolite lunare	Regolite lunare con legante
Tecnologia di stampa	Estrusione e Selective Separation Sintering (SSS)	Binder jetting (stampante D-Shape)
Descrizione	La Contour Crafting Corporation ha ottenuto finanziamenti dalla NASA per condurre ricerche riguardanti la costruzione tramite stampa 3D in ambiente extraterrestre. La Contour Crafting Corporation ha portato avanti la ricerca esplorando due diversi metodi di costruzione: il primo impiega l'estrusione di malta cementizia attraverso un ugello montato su un robot mobile; il secondo utilizza il Selective Separation Sintering per la realizzazione di <i>landing pad</i>. Questo secondo metodo consente di stampare in assenza di gravità. L'habitat, concepito per quattro persone, prevede un guscio stampato in 3D con tecnologia D-Shape usando la regolite lunare come inerte e un legante. Alcuni test di stampa sono stati condotti con del simulante di regolite lunare in un ambiente che replicasse le condizioni presenti sulla Luna. Il principale vantaggio della tecnologia binder jetting riguarda la possibilità di stampare pressoché qualsiasi geometria perché il letto di regolite funge da supporto. Tuttavia l'iniezione di legante in condizioni di vuoto può risultare problematica.	



© SEArch
© CloudsAO



© SEArch

Progetto	Mars Ice House	Mars X House
Progettisti e aziende coinvolte	SEArch, CloudsAO	SEArch, Apis Cor
Luogo	Marte	Marte
Anno	2015	2018
Materiale di stampa	Ghiaccio	Malta a base di regolite marziana
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico mobile)	Estrusione (braccio robotico Apis Cor)
Descrizione	Si tratta di un progetto per un habitat marziano vincitore del primo premio della prima fase della 3D-Printed Habitat Challenge in Virtual Design indetta dalla NASA. La proposta consiste nel realizzare unità abitative circondate da un guscio di ghiaccio stampato in 3D tramite bracci robotici. Il guscio in ghiaccio funge da protezione dalle radiazioni esterne ma, allo stesso tempo, non isola totalmente l'ambiente interno da quello esterno perché traslucido. In questo modo si può garantire anche l'illuminazione naturale interna. Mars X House è il progetto vincitore della terza fase della 3D-Printed Habitat Challenge in Virtual Design indetta dalla NASA. Si tratta di una proposta di insediamento con edifici multipiano a forma di iperboloide di rotazione, la cui superficie esterna andrebbe stampata in 3D con bracci robotici sollevati tramite gru, impiegando una malta a base di regolite marziana. La forma dell'iperboloide è stata scelta perché funzionerebbe meglio a compressione in una condizione di assenza di atmosfera.	

Edilizia extraterrestre

	 © ICON	 © ICON
Progetto	Mars Dune Alpha	Project Olympus
Progettisti e aziende coinvolte	Bjark Ingels Group (BIG), NASA, ICON	ICON
Luogo	Houston (Texas, USA)	Luna
Anno	2021	2023
Materiale di stampa	Lavacrete (malta cementizia sviluppata da ICON)	Malta a base di regolite lunare
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante <i>crane</i> ICON)	Estrusione (braccio robotico mobile ICON)
Descrizione	Si tratta di un prototipo abitativo di 1700 mq realizzato in un sito analogo terrestre, il Johnsons Space Center della NASA (Houston), finalizzato a simulare un vero habitat marziano ai fini di una missione. L'edificio ha una pianta regolare, volta a massimizzare il volume stampato, ed è quasi totalmente chiuso. Il tetto è costituito da pannelli, anch'essi stampati in 3D, in modo da evitare l'ibridazione della costruzione, che sarebbe più complessa in ambiente extraterrestre.	Si tratta di un progetto in corso di sviluppo per una stazione spaziale lunare, che comprenda non solo edifici protetti da un guscio di regolite, ma anche strutture accessorie (per esempio i landing pad per le astronavi) anch'esse da stampare in 3D. ICON sta attualmente mettendo a punto un sistema robotico mobile che possa funzionare autonomamente in ambiente extraterrestre.

4.2. La stampa 3D per le infrastrutture

Oltre al settore dell'edilizia, svariate sperimentazioni si stanno conducendo anche nell'ambito delle infrastrutture, in particolare dei ponti. Allo stato attuale si tratta di strutture di dimensioni modeste, per lo più destinate al passaggio di pedoni, complice anche il fatto che ancora non esiste una normativa che regoli i materiali stampati, poiché la sicurezza di tali materiali non è ancora comprovata e riconosciuta⁸⁴.

Differentemente dalla costruzione degli edifici, i quali si sviluppano in verticale e sono semplici da realizzare in maniera monolitica, tutti i casi analizzati di sperimentazioni finalizzate alla realizzazione di ponti – i quali, invece, si sviluppano orizzontalmente – riguardano oggetti discretizzati, per i quali i conci vengono stampati separatamente e successivamente assemblati *in situ* (figg. 50-51).

⁸⁴ Xu, W., Gao, Y., Sun C. and Wang, Z., *Fabrication and application of 3d-printed concrete structural components in the Baoshan Pedestrian Bridge project*, in Burry, J., Sabin, J., Sheil, B. and Skavara, M., *Fabricate 2020. Making Resilient Architecture*, UCL Press, London, pp. 140-147, 2020, <https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsvw.22>.



Fig. 50. Fase di stampa di uno dei blocchi del Nijmegen Bridge (© Zavhy).

Dunque, considerato il maggior controllo e la maggiore precisione che si possono ottenere se i componenti sono più piccoli, in molti casi si sono realizzate strutture dalle geometrie complesse, frutto di una modellazione parametrica o anche di processi di ottimizzazione topologica.

Anche in questo caso il materiale privilegiato è il calcestruzzo, talvolta rinforzato con fibre mescolate all'impasto, tuttavia esistono alcune interessanti eccezioni, come il MX3D Bridge (in acciaio)⁸⁵ o lo Smart Bridge (in poliestere riciclato e fibra di vetro)⁸⁶, che dimostrano quanto la tecnologia di fabbricazione additiva sia promettente nel settore delle costruzioni.

Di seguito si riportano i progetti ritenuti più significativi per quanto riguarda la stampa 3D per la realizzazione di elementi infrastrutturali.

Fig. 51. I blocchi del Nijmegen Bridge sul cantiere, durante la fase di assemblaggio
(© Studio Michiel van der Kley).

⁸⁵ Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G., Buchanan C., *Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge*, in *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 172, 2020.

⁸⁶ Sito web di Dar: <https://www.dar.com/insights/details/autodesk-university-2022-spotlights-dar%E2%80%99s-new-5-m-smart-bridge->.



Tabella 4. Ponti pedonali

	  © IAAC	 © Bart Maat/EPA  ©Marczoutendijk
Progetto	3D printed bridge	3D printed bridge
Progettisti e aziende coinvolte	Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), ACCIONA	Eindhoven University of Technology
Luogo	Madrid (Spagna)	Gemert (Paesi Bassi)
Anno	2016	2017
Materiale di stampa	Calcestruzzo fibro-rinforzato	Calcestruzzo
Tecnologia di stampa	Binder jetting (D-Shape)	Estrusione (stampante <i>crane</i> ROHACO)
Descrizione	Questo ponte pedonale è stato progettato presso l'Institute for Advanced Architecture of Catalonia e realizzato da ACCIONA sfruttando la tecnologia D-Shape, quindi una tipologia di stampa 3D binder jetting. In questo caso specifico è stato utilizzato come inerte un calcestruzzo fibro-rinforzato sperimentale, sviluppato dall'Università Politecnica della Catalogna. Il ponte copre una luce di 12 m ed è stato suddiviso in 8 blocchi. Il design è frutto di un processo di ottimizzazione topologica che riducesse al minimo il consumo di materiale ma, allo stesso tempo, massimizzasse la resistenza. Questo ponte ciclopeditonale ha una lunghezza di 6,5 m e una larghezza di 3,5 m. La forma generale è molto semplice e, nonostante l'intera geometria rientrasse nel piatto di stampa, si è preferita una suddivisione in blocchi che permettesse di avere i layer di stampa ortogonali alle forze e che desse la possibilità di stampare ciascun blocco estrudendo una spirale continua di materiale. Per migliorare la performance strutturale, si sono fatti passare dei cavi in acciaio post-tesi attraverso le cavità dei blocchi.	



© Thea van den Heuvel



© Professor Xu Weiguo

Progetto	MX3D Bridge	Pedestrian bridge
Progettisti e aziende coinvolte	Joris Laarman Lab, MX3D	Team JCDA della Tsinghua University
Luogo	Amsterdam (Paesi Bassi)	Shanghai (Cina)
Anno	2017	2019
Materiale di stampa	Acciaio	Calcestruzzo fibro-rinforzato
Tecnologia di stampa	Wire and arc additive manufacturing (braccio robotico)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	Si tratta del primo ponte al mondo realizzato in acciaio stampato in 3D. Nello specifico è stato usato il metodo <i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i> (WAAM). Il ponte copre una lunghezza di 10,5 m ed è costituito da quattro blocchi principali, a cui si aggiungono i quattro riccioli degli angoli. La stampa è stata effettuata usando un braccio robotico a sei assi. Per il metodo WAAM il materiale metallico da utilizzare per la fabbricazione deve essere in forma di filamento. Per la realizzazione dell'intero prototipo si sono utilizzati 1100 km di filamento di acciaio. Questo ponte pedonale è costituito da 44 pezzi stampati ed è frutto di una ricerca universitaria. Il materiale utilizzato è un calcestruzzo sperimentale (costituito da cemento sulfoalluminoso, sabbia, fibre di alcol polivinilico, acqua e altri additivi) sviluppato appositamente per il prototipo. Sui lati il ponte presenta un pattern parametrico in rilievo, realizzabile con facilità grazie alla tecnologia di fabbricazione additiva, che non ha richiesto l'uso di alcuna cassaforma.	

	 © Vertico	 © Xinhua
Progetto	Topology Optimized Bridge	3D printed concrete bridge
Progettisti e aziende coinvolte	Vertico, University of Ghent	Hebei University of Technology
Luogo	-	Tientsin, Cina
Anno	2019	2019
Materiale di stampa	Calcestruzzo	Calcestruzzo sperimentale
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico Vertico)	Estrusione
Descrizione	Questo prototipo mostra appieno le potenzialità formali offerte dalla stampa 3D. La geometria globale è frutto di un processo di ottimizzazione topologica. In questo caso i conci sono stati concepiti per essere cavi – pur mantenendo uno spessore di calcestruzzo ragionevole – in modo da consentire il rinforzo della struttura con armature e cavi post tesi. Questo ponte, realizzato presso l'Università di Hebei, ha vinto nel 2020 il titolo Guinness World Record come ponte stampato in 3D più lungo del mondo – ha una lunghezza totale di 28.15 m e presenta un arco di 17.98 m di luce. La forma riprende quella del Zhaozhou Bridge, un ponte storico cinese in pietra, ma le dimensioni sono all'incirca dimezzate. La struttura è stata stampata in blocchi attraverso una tecnologia messa a punto dalla stessa università.	



© Municipality of Nijmegen/Michiel van der Kley



© Dar

Progetto	Nijmegen Bridge	Smart Bridge
Progettisti e aziende coinvolte	Michiel van der Kley, Eindhoven University of Technology, Witteveen+Bos, BAM, Weber Beamix	Dar, Autodesk Research
Luogo	Nijmegen (Paesi Bassi)	-
Anno	2021	2022
Materiale di stampa	Calcestruzzo	Poliestere modificato con Glicole (PETG) e fibra di vetro
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante <i>crane</i>)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	Il ponte è stato realizzato in onore della nomina di Nijmegen come capitale verde europea del 2018. Esso copre una lunghezza di 29 m e presenta una forma organica molto complessa, a doppia curvatura, che avrebbe richiesto un costoso e complicato sistema di casseforme se realizzata con i metodi costruttivi tradizionali. Il design è stato curato da Michiel van der Kley, mentre l'ottimizzazione del modello per la stampa è stata effettuata da Witteveen+Bos. È un piccolo prototipo di ponte pedonale lungo cinque metri, realizzato a seguito di una sperimentazione su più piccola scala. A livello formale la geometria è molto complessa ed è frutto di un'ottimizzazione topologica. Dal punto di vista dell'uso dei materiali, essi sono stati scelti prediligendo i criteri di durabilità e sostenibilità – non solo il ponte è costituito per il 70% da materiali riciclati, ma essi sono a loro volta riciclabili.	

4.3. La stampa 3D per il design e le sperimentazioni formali

La stampa 3D trova sempre più applicazioni anche nel campo delle installazioni in grande scala – come i padiglioni architettonici –, un settore che non richiede necessariamente dimensioni elevate come quelle di un edificio e che allo stesso tempo punta a una sperimentazione molto più marcata, soprattutto perché, diversamente dalle costruzioni civili, spesso si tratta di strutture temporanee, che non devono soddisfare gli stessi requisiti di durabilità e resistenza.

All'interno di questo campo si stanno portando avanti ricerche molto variegata, volte ad analizzare tutte le potenzialità e i limiti della fabbricazione additiva sia dal punto di vista della geometria del prodotto finale sia dal punto di vista dell'uso di materiali molto innovativi, spesso concepiti sulla base di criteri di sostenibilità ed ecocompatibilità.

Molto spesso vengono impiegati macchinari di dimensioni più contenute, che sono più semplici da gestire e che consentono un controllo del dettaglio più accurato, soprattutto nei casi in cui si procede con la realizzazione di componenti caratterizzati da pattern superficiali o di forme molto complesse ottenute tramite algoritmi di modellazione parametrica o di ottimizzazione topologica.

L'uso della stampa 3D – in particolare quella per estrusione – unito alla modellazione parametrica ha portato anche alla definizione di alcune caratteristiche estetiche peculiari, non riproducibili con lavorazioni tradizionali: basti pensare all'uso del cosiddetto “errore controllato”. Si tratta una modalità di stampa gestita attraverso algoritmi specifici – non ottenibili attraverso i classici programmi di *slicing* – che consentono di deviare il percorso dell'ugello in maniera consapevole in determinati punti del modello 3D, creando pattern e trame più o meno marcate. Tale tecnica è legata soprattutto alla stampa 3D LDM e, anche se è piuttosto diffusa nella produzione di oggetti in ceramica di design – impossibili da realizzare manualmente col tornio –, se ne sta studiando l'applicazione per la realizzazione di elementi architettonici (conci, mattoni, lastre di rivestimento, ecc.).

Alcune interessanti sperimentazioni riguardanti l'uso dell'errore controllato sono portate avanti da Ronald Rael e Virginia Sanfratello, un duo di docenti universitari americani di architettura e design, fondatori

del gruppo Emerging Objects⁸⁷. Rael e Sanfratello si focalizzano anche sull'uso di materiali innovativi e meno comuni per la stampa 3D, come miscele a base di sale, gomma o legno.

Esistono anche altre possibilità di impiego della fabbricazione additiva a livello sperimentale: oltre a produrre direttamente l'oggetto finito si può sfruttare la stampa 3D per realizzare oggetti che fungano da ausilio a tecniche di lavorazione più tradizionali: si può fabbricare lo stampo o, ancora, la forma da cui ottenere il calco.

La prima modalità è esplorata in particolare presso l'ETH DI Zurigo, dove si svolgono sperimentazioni incentrate sulla realizzazione di oggetti geometricamente complessi attraverso l'utilizzo di stampi ottenuti tramite fabbricazione additiva⁸⁸.

Tale processo di costruzione è molto utile se i componenti architettonici da realizzare hanno geometria complessa ma non possono essere direttamente stampati – per esempio nel caso in cui sia necessario il rinforzo con armature metalliche interne. In questo caso realizzare uno stampo con le tecniche tradizionali comporterebbe un dispendio di risorse maggiore e risulterebbe molto più difficile.

Le numerose sperimentazioni dell'ETH trovano un'applicazione concreta nella DFAB House, un vero e proprio dimostratore per la realizzazione

Fig. 52. Vasi in ceramica realizzati con varie tipologie di errore controllato (© Emerging Objects).

⁸⁷ <https://emergingobjects.com/>

⁸⁸ <https://dbt.arch.ethz.ch/project/>



di elementi strutturali di forma complessa attraverso l'uso di casseforme stampate in 3D.

Sempre presso l'ETH si sta studiando la possibilità di realizzare, tramite fabbricazione additiva, stampi a base di sale solubili in acqua, in modo da eliminare eventuali problemi di rimozione⁸⁹.

Seppur questo metodo risulti vantaggioso sotto certi aspetti, soprattutto per la possibilità di aggiungere rinforzi interni all'elemento da produrre, è importante sottolineare che presenta anche un contro importante, e cioè che spesso la cassaforma non è riutilizzabile. Questo avviene soprattutto nel caso di geometrie intricate, che rendono impossibile scassare senza rompere lo stampo, oppure quando si impiegano materiali facilmente deformabili, come le plastiche.

Ciò comporta la produzione di scarti di fabbricazione, che talvolta si cerca di tamponare sia riducendo al minimo i materiali impiegati sia provando a sfruttare risorse riciclabili.

A tal proposito si può citare una ricerca attiva presso l'ETH di Zurigo che ha portato alla definizione del metodo "eggshell", così denominato perché consiste nella realizzazione di casseforme ultrasottili attraverso stampa 3D

Fig. 53. Rimozione della polvere inerte inutilizzata da una cassaforma stampata con tecnologia *binder jetting* (© ETH Zürich).

⁸⁹ Kleger, N., Fehlmann, S., Lee, S. S. et al., *Light-Based Printing of Leachable Salt Molds for Facile Shaping of Complex Structures*, in *Advanced Materials*, n. 34, 2022.



FDM di plastica riciclabile (PET-G), i quali vengono distrutti in fase di rimozione, similmente a un guscio d'uovo. Tali stampi vengono riempiti di calcestruzzo in maniera graduale, in modo da evitare deformazioni dovute alla pressione, previo posizionamento di armature metalliche interne. Il materiale della cassaforma, già utilizzato in quantità irrisoria, può essere rimacinato e re-impiegato per prototipi successivi⁹⁰.

Un metodo differente consiste nella fabbricazione di un oggetto da sfruttare per realizzare casseforme in materiale durevole, come il gesso, che possano essere utilizzati per la produzione di più pezzi. Due sperimentazioni di questo tipo sono state condotte dal prof. Fallacara presso il Politecnico di Bari e hanno portato alla produzione di due prototipi: una parete porta bottiglie e una scala elicoidale denominata Osteomorphic Helicoidal Staircase. In entrambi casi si tratta di strutture

Fig. 54. Forma stamata in PLA e calco in cemento da essa ottenuto per la realizzazione del modulo di una parete portabottiglie progettata da Giuseppe Fallacara (© Giuseppe Fallacara).

⁹⁰ Burger, J., Lloret, E., Scotto, F., Demoulin, T., *Eggshell: Ultra-Thin Three-Dimensional Printed Formwork for Concrete Structures*, in *3D Printing and Additive Manufacturing*, n. 7, issue 2, 2020, pp. 47-59.



costituite da moduli dalla geometria complessa, di cui è stato prodotto tramite *additive manufacturing* un primo modello, impiegato come “positivo” per la creazione di uno stampo dopo una fase di postproduzione – sono stati rimossi i supporti e le imperfezioni e il tutto è stato stuccato per rimuovere il pattern rigato tipico della stampa 3D. Questi oggetti sono stati usati per ottenere il “negativo” in gesso o in cemento, utilizzabili più volte per produrre dei pezzi in calcestruzzo o pietra ricomposta (fig. NN). Questo metodo è utile soprattutto per la produzione di più pezzi uguali tra loro, per la realizzazione dei quali non è necessario stampare tante casseforme, ma è sufficiente ottenere dallo stesso “positivo” uno o più stampi riutilizzabili. Diversamente, infatti, un dispendio eccessivo di energia per il funzionamento delle macchine potrebbe non rendere la stampa della cassaforma conveniente. È importante evidenziare che per alcune geometrie troppo complesse potrebbe essere difficile se non impossibile ottenere lo stampo smontabile.

Riassumendo, nel campo della stampa 3D applicata alle installazioni di design di grandi dimensioni sono percorribili tre diverse strade:

- stampa del pezzo: con l'*additive manufacturing* si ottiene direttamente l'oggetto finale. Questa modalità è la più conveniente dal punto di vista del consumo di materiale e consente di utilizzare espedienti di modellazione parametrica per caratterizzare la superficie con pattern e trame peculiari, difficilmente ottenibili diversamente. Tuttavia impedisce di inserire armature o altri tipi di rinforzo;
- stampa 3D della cassaforma: con questo espediente si possono aggiungere strutture metalliche e armature all'interno del pezzo, tuttavia si ottiene una maggiore quantità di materiale di risulta perché difficilmente le casseforme monolitiche sottili possono essere riutilizzate;
- stampa 3D della forma: stampando il positivo dell'oggetto si può ricavare il negativo in gesso o in altro materiale durevole che ne consenta il riutilizzo per più pezzi.

Di seguito si riportano i progetti ritenuti più significativi per quanto riguarda la fabbricazione additiva utilizzata nell'ambito del design e delle sperimentazioni.

Tabella 5. Padiglioni e installazioni di grandi dimensioni

		 
	© Shiro Studio	© John Wiley & Sons Ltd. Images © ICD, University of Stuttgart
Progetto	Radiolaria Pavilion	HygroSkin
Progettisti e aziende coinvolte	Shiro Studio, D-Shape	Achim Menges, Oliver David Krieg, Steffen Reichert, Institute for Computational Design
Luogo		Orléans (France)
Anno	2009	2013
Materiale di stampa	Polvere di dolomite (inerte) e “inchiostro strutturale” (legante)	Miscela a base di fibre di legno
Tecnologia di stampa	Binder jetting (D-Shape)	Estrusione
Descrizione	Il Radiolaria Pavilion è stato realizzato con lo scopo di dimostrare le potenzialità della stampante di grandi dimensioni appena sviluppata da D-Shape, realizzando una geometria complessa autoportante senza l'uso di stampi e sostegni. Il nome denota l'ispirazione ai radiolari, protozoi caratterizzati da un esoscheletro siliceo. La geometria finale è stata ottenuta in circa quattro settimane, sperimentando vari metodi e optando, infine, per un software di Sub-Division. Il processo di stampa ha richiesto una settimana. Si tratta di un prototipo di concio responsivo costituito da “petali” stampati in 3D usando una miscela a base di fibre di legno. Il materiale di stampa è stato accuratamente studiato in modo da modificare la propria conformazione in base al livello di umidità nell'aria. Perciò i “petali” sono progettati in modo da piegarsi e aprirsi in condizioni di bassa umidità (giornate soleggiate) e per chiudersi in caso di umidità elevata (maltempo).	



© Emerging Objects



© Fabrice Dall'Anese

Progetto	Saltygloo	Digital Grotesque I e II
Progettisti e aziende coinvolte	Emerging Objects	Michael Hansmeyer, Benjamin Dillenburger, ETH di Zurigo, Voxeljet, Christenguss, Strobel Qartzsand, Bosshard + Co., Suter Elektro, Pro Helvetia
Luogo	Redwood City (California, USA)	Digital Grotesque I: Orléans (Francia), Digital Grotesque II: Parigi (Francia)
Anno	2013	2013-2017
Materiale di stampa	Miscela a base di sale	Polveri lapidee
Tecnologia di stampa	-	Binder jetting
Descrizione	È un piccolo padiglione costituito da 336 pannelli traslucidi, realizzati tramite stampa 3D <i>binder jetting</i> di una miscela a base di sale. La scelta del materiale è dettata da criteri di sostenibilità: La San Francisco Bay, dove si trova Redwood City, è famosa per le sue saline, perciò il sale rappresenta un materiale a chilometro zero. Ciascun pannello presenta una geometria che ricorda i cristalli di sale. Si tratta di un progetto che ha portato alla realizzazione di due installazioni in grande scala. Il primo prototipo è stato esposto al FRAC Centre di Orléans, il secondo al Museo Pompidou di Parigi. Sono state realizzate in più blocchi stampati tramite tecnologia <i>binder jetting</i>, utilizzando della sabbia come inerte e della resina come legante. La geometria dei manufatti, ottenuta tramite algoritmi, è estremamente complessa e mira a dimostrare le potenzialità della stampa 3D applicata alla costruzione: è stato possibile, infatti, stampare con una risoluzione di 280 µm.	

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura



© Matthew Millman Photography



© Emerging Objects

Progetto	Bloom	Cool Brick
Progettisti e aziende coinvolte	Emerging Objects, Kent Wilson, Alex Schofield, Sofia Anastassiou, Yina Dong, Dr. Stephan Adams, Alex Niemeyer, Ari Oppenheimer, Reem Makkawi, Steven Huang.	Emerging Objects, Tethon 3D
Luogo	-	-
Anno	2015	2015
Materiale di stampa	Calcestruzzo sperimentale	Miscela di ceramica e resina
Tecnologia di stampa	-	Stereolitografia (stampante sviluppata da TETHON 3D)
Descrizione	Si tratta di un padiglione sperimentale, costituito da 840 concetti traforati secondo una trama parametrica, tutti di forma differente. I pezzi sono stati numerati e pre-assemblati in sedici pannelli, che si possono montare in poche ore. I concetti sono stati ricoperti con un polimero a base di derivati vegetali, resistente ai raggi UV, per conferire una maggiore durabilità.	Si tratta di un prototipo di mattone la cui particolare geometria traforata ne consente sia la ventilazione sia il raffrescamento. Esso, infatti, mira a raccogliere l'umidità come una spugna e, successivamente, il processo di evaporazione procura un abbassamento della temperatura del mattone. Inoltre il gioco di sporgenze e rientranze fa in modo che parte della superficie risulti in ombra, aumentando ulteriormente il raffrescamento.



© SHoP



© Emerging Objects

Progetto	Flotsam & Jetsam	Seed Stitch
Progettisti e aziende coinvolte	SHoP Architects, Branch Technology, Thornton Tomasetti, CORE, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Techmer PM	Emerging Objects, Kent Wilson, Alex Schofield
Luogo	Miami (Florida, USA)	-
Anno	2016	2016
Materiale di stampa	ABS additivato con fibra di bambù	Argilla
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico Branch Technology))	Estrusione (3D potter Deltabot)
Descrizione	Si tratta di due padiglioni di forma organica realizzati in occasione della Miami Design Fair del 2016. Le strutture, oltre a presentare una geometria complessa, sono state soggette a un'ottimizzazione di tipo <i>lattice</i> . Per la stampa sono stati necessari circa 75 km di filamento di ABS additivato con fibre di bambù. Il blocco più grande pesa più di 300 kg.	Si tratta di un prototipo di rivestimento per facciate costituito da piastre in argilla, sagomate in modo da potersi agganciare a supporti posteriori. La superficie è trattata con un pattern prodotto dal cosiddetto metodo dell'errore controllato: l'ugello, deviando periodicamente verso l'esterno, produce dei piccoli rigonfiamenti. Nel complesso la finitura dei pannelli ricorda quella di riquadri di lana lavorata a maglia.

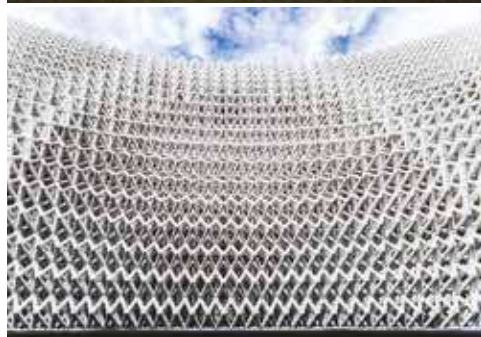


© ASW



© Ana Anton, © Thodoris Kyttas, © Ahmed Elshafei, © Tom Mundy

Progetto	Arachne	3D printed reinforced beam
Progettisti e aziende coinvolte	Archi-Solution Workshop (ASW)	Ana Anton (ETH di Zurigo)
Luogo	Foshan (Cina)	Zurigo (Svizzera)
Anno	2017	2017
Materiale di stampa	-	Sabbia con legante
Tecnologia di stampa	-	Binder jetting
Descrizione	Questa “pelle” modellata in maniera parametrica è costituita da oltre 2000 componenti interamente stampati con tecnologia FDM. I blocchi sono stati fabbricati con cinquanta stampanti nell’arco di quattro mesi. Le imperfezioni in corrispondenza dei giunti sono state compensate da cuscinetti di silicone. Si tratta di due prototipi di travi reticolari costituite ciascuna da sette blocchi a mutuo incastro. I pezzi sono stati concepiti in modo che, una volta assemblati e precompressi, siano soggetti unicamente a sforzi di compressione, data la natura del materiale lapideo, che non è resistente a trazione. L’ottimizzazione strutturale dei componenti è stata possibile per via della precisione garantita dalla stampante <i>binder jetting</i> impiegata: si è stampato con una risoluzione di 0,3 mm.	



© Actlab



© Arhtur Mamou-Mani

Progetto	Trabeculae Pavilion	Conifera
Progettisti e aziende coinvolte	Roberto Naboni, Anja Kunić, Luca Brescghello	Arhtur Mamou-Mani e Wasp
Luogo	Milano	Milano
Anno	2019	2019
Materiale di stampa	Biopolimero	Bioplastica e legno
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampanti delta WASP)	Estrusione (stampanti delta WASP)
Descrizione	È un padiglione a forma di sella costituito da 352 blocchi stampati in materiale plastico. L'intera struttura è stata svuotata applicando un'ottimizzazione di tipo <i>lattice</i>, ma lo spessore dei bracci del reticolo è stato calibrato parametricamente, in modo da diventare più o meno spesso a seconda delle sollecitazioni. I blocchi sono stati stampati con macchine Delta Wasp (quattro Wasp 40/70 e una Wasp 60/100). È un padiglione modulare realizzato con una stampante Wasp 3 mt dal Wasp Hub London in collaborazione con gli Hub di Milano, Venezia e Macerata. È un esempio concreto di fabbricazione diffusa, dato che è stato possibile realizzarlo grazie alla collaborazione da remoto tra i vari Hub. L'intera struttura è costituita da settecento componenti piani traforati, concepiti per essere assemblati grazie a un sistema di incastri. L'installazione è stata esposta in occasione della Milano Design Week del 2019.	

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura



© Angela Yoo, Digital Building Technologies

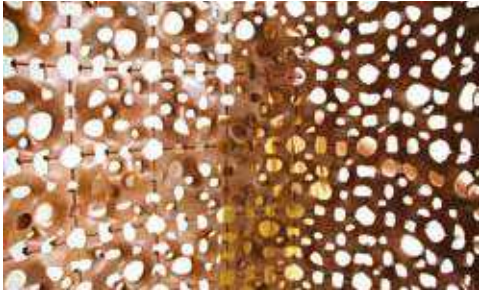


© Benjamin Hofer, Digital Building Technologies



© Studio RAP

Progetto	Concrete Choreography	New Delft Blue
Progettisti e aziende coinvolte	MAS DFAB in Architecture and Digital Fabrication ETH Zurich, NCCR Digital Fabrication	Studio RAP
Luogo	Zurigo (Svizzera)	Delft (Paesi Bassi)
Anno	2019	2019
Materiale di stampa	Cemento	Ceramica
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	Si tratta di un'installazione composta da nove colonne di forma organica stampate in 3D. Il lavoro è stato portato avanti dagli studenti del Master of Advanced Studies in Digital Fabrication and Architecture dell'ETH di Zurigo.	
	Questo progetto è stato realizzato nella città storica di Delft. Si tratta di una reinterpretazione della porcellana blu di Delft: attraverso la fusione tra tradizione e innovazione tecnologica (design computazionale e fabbricazione digitale) lo studio punta a innovare l'uso della ceramica decorativa.	

	  © Forust Corp	  © Schran Image
Progetto	Sawdust Screen	Beyond the Geometry Plastic 3D Printed Pavilion
Progettisti e aziende coinvolte	Emerging Objects, Molly Wagner, Victoria Leroux, Forust Corp	Archi-Union Architects
Luogo	-	Nanchino (Cina)
Anno	2020	2021
Materiale di stampa	Legno	Plastica
Tecnologia di stampa	Binder jetting (Forust Corp)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	Si tratta di una parete traforata – che può fungere da schermatura o da separé – costituita da blocchi stampati in 3D utilizzando la polvere di scarto della lavorazione del legno. La geometria organica dei concii è ispirata alla conformazione del legno a livello microscopico: osservando un fusto sezionato, esso appare traforato per via della distribuzione dei vasi.	È un padiglione di forma complessa, posto all'ingresso est del parco divertimenti Happy Valley di Nanchino. La struttura copre un'area di 52 m × 26 m. È stato realizzato con una plastica modificata resistente ai raggi UV e colorata parametricamente, in modo da poter ottenere 256 colori differenti. Per l'assemblaggio ci si è serviti di macchine CNC dotate di livella laser e di un sistema di scansione 3D. È stato possibile raggiungere altissimi livelli di precisione attraverso sistemi di predizione delle deformazioni per la plastica modificata impiegata.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 4. La stampa 3D applicata all'architettura



© Studio RAP



© IMd Raadgevende Ingenieurs

Progetto	Ceramic House	PET-X
Progettisti e aziende coinvolte	Studio RAP	IMd Raadgevende Ingenieurs, Ector Hoogstad, TUDelft, Nagami
Luogo	Amsterdam (Paesi Bassi)	Rotterdam (Paesi Bassi)
Anno	2022	2023
Materiale di stampa	Ceramica	Plastica PET ottenuta da bottiglie riciclate
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico)	Estrusione
Descrizione	Lo studio RAP si è occupato del design della facciata di una boutique di Amsterdam sfruttando la stampa 3D in argilla. I filari dei conci e i colori scelti riprendono quelli degli edifici storici adiacenti, in modo da mantenere una continuità visiva, tuttavia la superficie è caratterizzata da una trama parametrica che ricorda la lavorazione a maglia della lana e che denuncia anche la tecnica di fabbricazione usata. Si tratta di un chiaro esempio del possibile incontro tra tradizione e innovazione. Si tratta di un prototipo di struttura voltata di geometria organica realizzata interamente con plastica riciclata. La <i>shell</i> è composta da varie porzioni, ciascuna avente una massa di circa 300 kg. La geometria è stata ottimizzata in funzione della leggerezza, mantenendo alcune porzioni vuote.	



Fig. 55. Beyond the
Geometry Plastic 3D
Printed Pavilion
(© Schran Image).

Tabella 6. Stampa 3D per casseforme di geometria complessa



© Lisa Ricciotti/XtreeE



©Andrei Jipa, Hyunchul Kwon, Mathias Bernhard, Philippe Steiner

Progetto	Krypton	3D printed slabs
Progettisti e aziende coinvolte	Marc Dalibard, XtreeE, EZTC Architecture & Design Research	Andrei Jipa, Mathias Bernhard, Mania Aghaei Meibodi, Benjamin Dillenburger, Christenguss AG, NCCR Digital Fabrication
Luogo	Aix-en-Provence	Zurigo
Anno	2016	2016
Materiale di stampa	Cassaforma a perdere in calcestruzzo, riempita con Ultra-high Performance Fibre Concrete (UHCFP)	Cassaforma in sabbia stampata tramite <i>binder jetting</i> , riempita con calcestruzzo fibrorinforzato.
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico XtreeE)	Binder jetting
Descrizione	Si tratta di una colonna dalla geometria organica alta 4 m, realizzata con cassaforma a perdere. Essa è stata stampata in uno speciale calcestruzzo ultra-performante additivato con fibre, mantenendo l'interno cavo, ed è stata successivamente riempita in UHCFP. In questo caso, quindi, lo stampo è diventato parte integrante della struttura stessa. Si tratta di uno dei primi casi di elemento strutturale stampato utilizzato per un edificio pubblico (in questo caso una scuola). Presso l'ETH di Zurigo si sono sviluppati questi due prototipi di lastre ottimizzate topologicamente, con lo scopo di ridurre la massa pur mantenendone la resistenza, con lo scopo di limitare il consumo di calcestruzzo.	

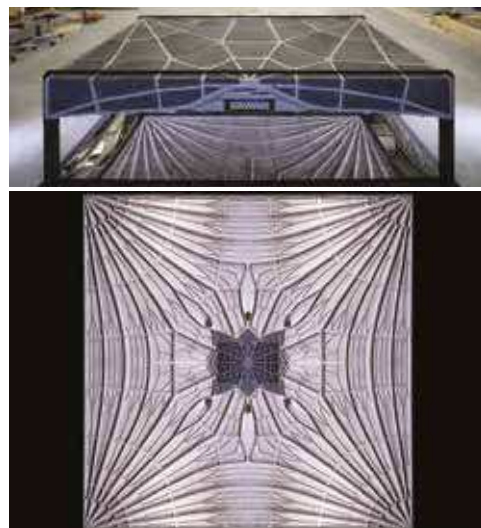


© Gramazio Kohler Research, ETH Zürich

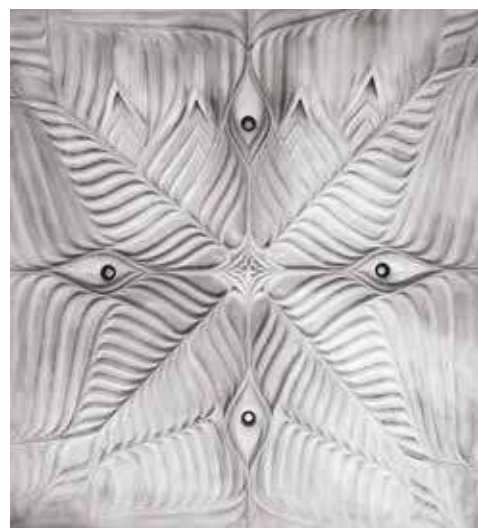


© Tom Mundy | ETH Zürich

Progetto	Future Tree	The Smart Slab
Progettisti e aziende coinvolte	Gramazio Kohler Research, ETH Zurich	Digital Building Technologies Group dell'ETH di Zurigo, Bürgin Creations, Frutiger, Voxeljet, Georg Ackermann Gmbh, Stahlton, Christenguss, Fischer Rista, Rudolf Glauser, GOM International,
Luogo	Esslingen (Germania)	Dübendorf (Svizzera)
Anno	2017-2019	2018
Materiale di stampa	PET-G	Cassaforma stampata con polveri lapidee e legante
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico)	Binder jetting
Descrizione	Future Tree è una struttura costituita da una copertura diafana in legno sorretta da un pilastro centrale in calcestruzzo. Il pilastro – svasato verso l'alto e caratterizzato da un pattern superficiale parametrico – è stato realizzato attraverso una cassaforma sottile stampata in 3D. La necessità di rinforzare l'elemento con armature metalliche, infatti, ha impedito di stamparlo direttamente in cemento. La procedura di realizzazione è denominata “eggshell” per via dell'estrema sottigliezza della cassaforma (1,5 mm), volta a minimizzare lo spreco di materiale. Per evitare deformazioni della cassaforma dovute alla pressione del calcestruzzo, questo viene versato gradualmente. Lo Smart Slab fa parte delle sperimentazioni della DFAB House. È un prototipo di solaio ottimizzato strutturalmente e diviso in undici porzioni. L'ottimizzazione ha consentito di avere una struttura con un peso circa 70% inferiore a quello di un solaio analogo realizzato in maniera tradizionale. Lo “svuotamento” richiesto dal processo di ottimizzazione è stato declinato in modo da diventare un “cassettonato 2.0”, con un'estetica fortemente legata alla modellazione digitale e parametrica. Il solaio è realizzato in calcestruzzo ed è stato ricavato a partire da una cassaforma stampata in 3D con tecnologia <i>binder jetting</i>.	



© Andrei Jipa



© Andrei Jipa

Progetto	Funicular Floor	Hires Concrete
Progettisti e aziende coinvolte	Block Research Group dell'ETH di Zurigo, Architecture and Building Systems dell'ETH di Zurigo, Digital Building Technologies dell'ETH di Zurigo, BASF, Holcim, NCCR dfab, Bekaert	Block Research Group dell'ETH di Zurigo, Architecture and Building Systems dell'ETH di Zurigo, ROK Architects, Empa, Burgin Creations, Holcim, BASF, Christenguss, Rudolf Glauser, Georg Ackermann, NCCR Digital Fabrication
Luogo	Zurigo (Svizzera)	Dübendorf (Svizzera)
Anno	2019	2021
Materiale di stampa	Cassaforma stampata con polveri lapidee e legante	Cassaforma stampata
Tecnologia di stampa	Binder jetting	Binder jetting
Descrizione	Si tratta di un prototipo di solaio funicolare, ottimizzato in modo da avere più spessore in corrispondenza di alcune nervature di rinforzo. Il disegno di queste nervature ha portato ad avere una sorta di reinterpretazione delle nervature tipiche degli edifici gotici. L'ottenimento di questa finitura superficiale è stato possibile grazie all'impiego di una cassaforma stampata in 3D con tecnologia <i>binder jetting</i>. Hires Concrete fa parte delle sperimentazioni della HiLo Unit, un <i>workspace</i> collaborativo del NEST (Next Evolution Sustainable Building Technologies), ossia un edificio dedicato alla ricerca e alla sperimentazione nel settore delle costruzioni. Hires Concrete è un solaio caratterizzato da un intricato disegno tridimensionale ed è realizzato in cemento gettato direttamente in opera all'interno da una cassaforma costituita da moduli stampati in 3D.	

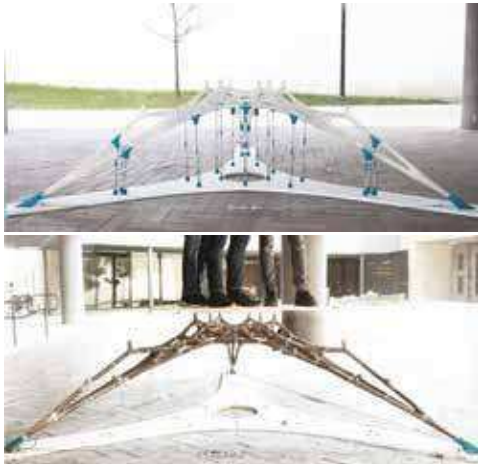
	 © Gramazio Kohler research, ETH Zürich	 © DART Lab
Progetto	Eggshell Pavilion	Cavity Shell
Progettisti e aziende coinvolte	Gramazio Kohler Research, ETH Zurich	Mania Aghaei Meibodi, Stuti Bindlish, Zaid M. Marji (DART Lab della Taubman School of Architecture and Urban Planning)
Luogo	Weil am Rhein (Germania)	Ann Arbor (Michigan, USA)
Anno	2022	2023
Materiale di stampa	PET-G parzialmente riciclato da precedenti casseforme eggshell, rinforzato con fibra di vetro	Plastica
Tecnologia di stampa	Estrusione (braccio robotico)	Estrusione (braccio robotico)
Descrizione	Questo padiglione è stato esposto al Vitra Design Museum di Weil am Rhein. Sia il fusto sia la parte sommitale svasata di queste strutture <i>freeform</i> sono realizzati con la tecnologia <i>eggshell</i>, in questo caso riciclando parte della plastica usata per altre sperimentazioni simili. La cassaforma ha uno spessore variabile (3,5-5,0 mm). L'intera struttura è rinforzata con armature interne.	Si tratta di un esperimento eseguito in piccola scala per un metodo di costruzione di strutture totalmente compresse dalla geometria complessa. Vengono realizzate casseforme in plastica stampata in 3D con spessori molto piccoli. Questi stampi vengono riempiti di calcestruzzo in maniera graduale, in modo da evitare danneggiamenti dovuti alla pressione idrostatica. Il prototipo Cavity Shell è iscritto in una circonferenza di 1,4 m di raggio ed è alto 0,8 m.



Fig. 56. Dettaglio della
Osteomorphic Helicoidal
Staircase (© Gaz Blanco).

Tabella 7. Stampa 3D di un “positivo” per ottenere uno stampo

	  © Giuseppe Fallacara	 © Gaz Blanco
Progetto	Parete portabottiglie	Osteomorphic Helicoidal Staircase
Progettisti e aziende coinvolte	Giuseppe Fallacara, Tarricone Prefabbricati	Giuseppe Fallacara, Tarricone Prefabbricati, Stilmarmo, CNC Design, Mapei
Luogo	Corato	Verona
Anno	2023	2023
Materiale di stampa	Pellet di PLA	Pellet di PLA
Tecnologia di stampa	Estrusione (stampante Delta Wasp 3 mt)	Estrusione (stampante Delta Wasp 3 mt)
Descrizione	Si tratta di una parete portabottiglie realizzata per un privato e pensata per avere alloggiamenti per bottiglie di vino. Essa è costituita da conci di forma complessa in pietra ricomposta. Il calco è stato stampato in PLA e da esso si sono ottenuti gli stampi in calcestruzzo.	Si tratta di un prototipo di scala autoportante precompressa. I conci, di geometria complessa, sono realizzati in pietra ricomposta, mentre le pedate in pietra naturale di Apricena. Il nome deriva dalla forma del modello, che richiama una colonna vertebrale. Per poter realizzare le “vertebre” si è stampato un calco in PLA; tale prototipo è stato stuccato e rifinito ed è servito a realizzare gli stampi in calcestruzzo. La Osteomorphic Helicoidal Staircase è stata esposta presso la mostra Marmomac Meets Academies 2023, a Verona.

Capitolo 5

Additive manufacturing e stereotomia

Gli esempi brevemente illustrati nelle tabelle alle pagine precedenti riguardano applicazioni generiche della stampa 3D ai campi dell'architettura e del design e comprendono sia progetti concepiti per essere monolitici, sia discretizzati.

Nei paragrafi a seguire, invece, ci si soffermerà su alcuni particolari casi studio riguardanti altrettanti padiglioni realizzati tramite *additive manufacturing* con criteri tali da poterli considerare stereotomici. Prima di procedere, tuttavia, si è ritenuto importante fare una breve introduzione sull'applicazione della fabbricazione additiva alla disciplina stereotomica.

5.1. Fabbricazione additiva e stereotomia

Si è già spiegato che la manifattura additiva – seppur di tipo tradizionale – è stata ampiamente applicata al mondo lapideo, tuttavia i primi brevetti di pietra artificiale risalgono alla fine dell'Ottocento⁹¹, quando la stereotomia era ormai già entrata in disuso. Non esistono, quindi, esempi di volte stereotomiche storiche realizzate in pietra ricomposta e, quindi, tramite un processo di realizzazione basato sull'addizione di materiale.

Solo in epoca più recente, dopo il rinnovato interesse per la sperimentazione nella costruzione di spazi voltati, sono stati realizzati dei prototipi di questo tipo, ossia con conci in pietra ricomposta con l'ausilio di casseforme.

Un esempio di oggetto stereotomico in pietra ricomposta è la scala E.L.I.C.A., progettata dal prof. Giuseppe Fallacara e realizzata con Tarricone Prefabbricati, azienda coratina. Si tratta di una scala elicoidale con i cosciali portanti realizzati in pietra artificiale armata con cavi di acciaio post-tesi. I cosciali, modulari, possono essere realizzati da un unico stampo⁹².

Un altro esempio concreto di applicazione di manifattura additiva tradizionale applicata alla stereotomia è legato ad alcune sperimentazioni condotte da Pedro Azambuja Varela e José Pedro Sousa, riguardanti la possibilità di realizzare casseforme smontabili e regolabili – un sistema

⁹¹ Calabria, C., *La pietra artificiale dalle origini ad oggi: evoluzione della tecnica e applicazioni*, in Fallacara, G., *Stereotomia Ri-composta. Evoluzione di una disciplina che insegna a costruire lo spazio*, Roma, Aracne Editrice, 2012, pp. 71-92.

⁹² Fallacara, G., *Stereotomia Ri-composta. Evoluzione di una disciplina che insegna a costruire lo spazio*, Roma, Aracne Editrice, 2012.



Fig. 57. La scala
E.L.I.C.A. (© Giuseppe
Fallacara).



Fig. 58. Lo stampo
utilizzato per realizzare
il gradino della scala
E.L.I.C.A. in pietra
ricomposta (© Giuseppe
Fallacara).

molto più economico rispetto all'uso di pietra da taglio⁹³. Una prima versione di tali stampi – concepiti per la realizzazione di blocchi a base poligonale – funziona nella maniera seguente: alcune bacchette, che costituiscono gli spigoli del concio, vengono disposte nella giusta posizione e con la corretta inclinazione all'interno di fori ottenuti con l'ausilio di un braccio robotico su una base di legno; fatto ciò, attorno alle bacchette viene avvolto un nastro di gomma in tensione, che delimita le facce del blocco (figg. 59-62). Questo primo sistema si è rivelato poco efficace poiché il nastro di gomma tende a cedere sotto il peso della malta, provocando deformazioni. Dopo vari tentativi per contenere le imprecisioni e le deformazioni, è stato messo a punto un nuovo sistema che prevede l'impiego di bacchette e piastre metalliche⁹⁴. Esso è stato usato per realizzare alcuni conci a scala

Figg. 59-62. Il metodo messo a punto da Varela e Sousa per la realizzazione di conci poligonali in pietra ricomposta (© Pedro De Azambuja Varela, José Pedro Sousa).

⁹³ Azambuja Varela, P., Sousa, P. D., *Reinforced, Reusable, Reconfigurable Molds for Cast Voussoirs*, in Kepczynska-Walczak, A., Bialkowski, S. (a cura di.), *Computing for a Better Tomorrow - Proceedings of the 36th eCAADe Conference* (Lodz, Polonia, 19-21 settembre 2018), vol. 1, 2018, pp. 771-780.

⁹⁴ Ibid.



reale della Tamandua Vault⁹⁵.

Dopo aver analizzato i casi citati, è doveroso fare alcune considerazioni in merito alla manifattura additiva tradizionale applicata alla stereotomia: il getto di una malta presuppone l'uso di una cassaforma, la quale, a sua volta, ha bisogno di un "positivo" per essere realizzata. Questo procedimento, dunque, funziona bene in caso di produzione seriale – per cui da un solo stampo si ottengono più blocchi – ma in caso di numerose variazioni tra i pezzi può rivelarsi un metodo complesso e dispendioso.

Anche un sistema versatile come quello messo a punto da Azambuja Varela e da Sousa presenta alcune criticità, tra cui non vanno trascurate le limitazioni a livello geometrico: esso è adatto a blocchi dalla geometria molto semplice e diventa del tutto inutilizzabile nel caso in cui si vogliano produrre elementi con giunti a incastro o a doppia curvatura.

Fig. 63. La realizzazione di un concio in scala reale con il metodo aggiornato delle casseforme smontabili (© Pedro De Azambuja Varela, José Pedro Sousa).

Fig. 64. Simulazione renderizzata della Tamandua Vault (© Pedro De Azambuja Varela, José Pedro Sousa).

⁹⁵ Azambuja Varela, P., Sousa, P. D., *Liquid Stereotomy - the Tamandua Vault*, in Werner, L., Koering, D. (a cura di), *Anthropologic: Architecture and Fabrication in the cognitive age - Proceedings of the 38th eCAADe Conference* (Berlino, Germania, 16-18 settembre 2020), vol. 2, 2020, pp. 361-370.



L'uso della pietra artificiale, dunque, predilige gli oggetti composti da conci modulari – come la scala E.L.I.C.A. – ma risulta sfavorevole in caso di geometrie complesse e caratterizzate da conci tutti differenti tra loro.

In questo caso l'*additive manufacturing* digitale risulta la tecnica di fabbricazione più idonea poiché consente la massima customizzazione con il minimo spreco di materiale, dato che non richiede casseforme.

La stampa 3D, come si vedrà anche con gli esempi che seguiranno, porta a un vero e proprio linguaggio innovativo per la stereotomia, la quale può beneficiare di nuove possibilità formali e nuovi canoni estetici difficilmente ottenibili diversamente.

Si potrebbe definire “stereotomia 3D” questa versione aggiornata della disciplina stereotomica, la quale da una parte può prevedere l'adozione di paradigmi costruttivi classici, con conci pieni e strutture che evocano la massività tipica della pietra, dall'altra può essere declinata in maniera differente: i blocchi possono essere svuotati, possono essere trattati con trame superficiali, possono diventare oggetti totalmente cavi – come dei “cassettoni 2.0” aventi funzione strutturale – che permettono di realizzare strutture leggere e diafane, diametralmente opposte alla pesantezza del materiale lapideo.

5.2. Stampa 3D e spazi voltati: analisi di casi studio

Come già spiegato, un manufatto, per potersi considerare stereotomico, deve presentare tre invarianti: quello prefigurativo, quello tecnico-geometrico e quello statico.

Gli esempi di strutture discretizzate precedentemente elencate non rispondono a questi criteri, perciò non possono essere considerati stereotomici. Si consideri, per esempio, il ponte pedonale di Shanghai progettato dal Team JCDA della Tsinghua University: esso è costituito da conci customizzati, che, tuttavia, non sono progettati per assecondare il comportamento statico a compressione. Come mostrato in figura 65, in questo caso i giunti sono tutti disposti in verticale per permettere di utilizzare un processo di stampa semplice con i *layer* tutti paralleli tra loro, tuttavia la configurazione più corretta dal punto di vista statico prevede che i giunti siano orientati perpendicolarmente alle tensioni, come normalmente accade negli archi.

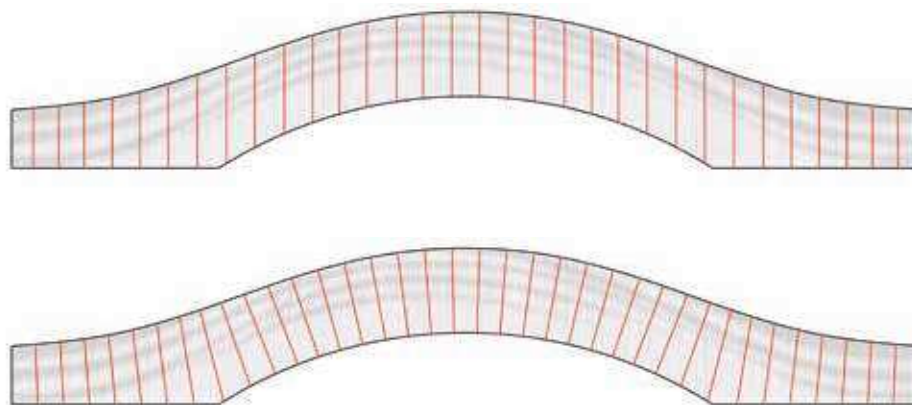


Fig. 65. Rappresentazione schematica della configurazione reale del ponte pedonale di Shanghai, con i giunti verticali (in alto) e della configurazione stereotomica, con i conci non paralleli tra loro (in basso).

L'applicazione della stampa 3D alla disciplina stereotomica è ancora poco indagata, se paragonata agli altri settori dell'architettura e del design, e ciò è da ricondursi soprattutto al fatto che questa richieda padronanza di argomenti specifici come la modellazione tridimensionale complessa e la comprensione e gestione degli spazi voltati dal punto di vista statico. Inoltre il processo costruttivo risulta molto più complicato se paragonato a quello monolitico adottato, per esempio, per l'edilizia residenziale, poiché è necessaria una fase di assemblaggio che richiede non solo centine grandi e costose, ma anche una notevole precisione nel posizionamento corretto dei conci sulla superficie della volta.

Tutte queste caratteristiche, che rendono le volte stereotomiche poco appetibili per il mercato, fanno sì che gli esempi di seguito analizzati riguardino soprattutto sperimentazioni da parte di enti universitari e di ricerca oppure costruzioni temporanee progettate per eventi o esposizioni.

5.2.1. VULCAN

VULCAN è una struttura voltata realizzata dal Laboratory for Creative Design (LCD) in occasione della Design Week di Pechino del 2015. Si tratta di una volta caratterizzata, in pianta, da una simmetria triangolare e da una luce di 8,08 m per un'altezza di 2,88 m. Essa è suddivisa in 1086 conci stampati in 3D in materiale plastico e richiama nell'aspetto la forma a fungo che viene generata a seguito di un'eruzione vulcanica – da qui il nome – per rappresentare la paura e il rispetto dell'uomo nei confronti delle imprevedibili forze della natura.

La geometria globale è stata ricavata attraverso un metodo di *form finding* volto a individuare, partendo dalla configurazione planimetrica, una

struttura funicolare autoportante, in modo che la volta sia autobilanciata sotto l'influenza della forza di gravità.

Ciascuna delle tre porzioni identiche della volta è costituita da blocchi tutti diversi fra loro, che hanno richiesto ciascuno il proprio codice di realizzazione. In questo emerge il vantaggio principale dell'uso della stampa 3D nella realizzazione di strutture complesse caratterizzate da una forte variabilità dei singoli elementi: realizzare questa stessa struttura nel medesimo materiale con un processo standard avrebbe richiesto la realizzazione di numerosissimi stampi, e l'intero processo sarebbe stato molto più complesso e dispendioso.

La fabbricazione additiva, in questo caso, può essere considerata una scelta conveniente non solo dal punto di vista della flessibilità in termini di customizzazione dei singoli blocchi, ma anche dal punto di vista delle possibilità offerte per le finiture superficiali, importanti dal punto di vista estetico. I conci di VULCAN, infatti, sono stati concepiti per permettere alla struttura di avere un aspetto più "solido" ai bordi e di alleggerirsi in corrispondenza della sommità, attraverso l'adozione di due famiglie di forme: nel primo caso si sono stampati conci chiusi, caratterizzati da un pattern superficiale a griglia, mentre nel secondo caso i blocchi sono stati svuotati e stampati attraverso una rete di filamenti di materiale che hanno permesso di creare oggetti diafani, impossibili da replicare con altre tecniche costruttive. È importante specificare che tale possibilità è stata offerta dal tipo di fabbricazione additiva scelta, quella FDM, poiché usare un materiale fluido avrebbe impedito di ottenere questo tipo di geometrie e questo livello di precisione.

Di contro, la stampa 3D FDM può richiedere tempi di produzione piuttosto lunghi: in questo caso, infatti, sono serviti trenta giorni per fabbricare tutti i 1086 conci, adoperando venti stampanti di larghe dimensioni. Inoltre, per via della complessità della struttura, sono stati necessari ulteriori quindici giorni di assemblaggio.⁹⁶

Vulcan rappresenta un importante esempio di una possibile applicazione innovativa della fabbricazione additiva alla disciplina stereotomica e delle potenzialità formali e di materiali offerte da questo metodo di fabbricazione. Vulcan è un perfetto dimostratore sia del livello di precisione ottenibile

⁹⁶ Xu, F., VULCAN: *Closing the Loop in 3D-Printed Architectural Design*, in *Architectural Design*, vol. 86, Issue 5, 2016, pp. 82-91.

con la stampa 3D FDM sia della complessità formale a cui ci si può spingere, ottenendo risultati che non si potrebbero ottenere con altri metodi costruttivi. D'altro canto, è importante ribadire che il materiale plastico utilizzato in questo caso non è adatto al campo della costruzione vera e propria, ma solo a quello delle installazioni temporanee.

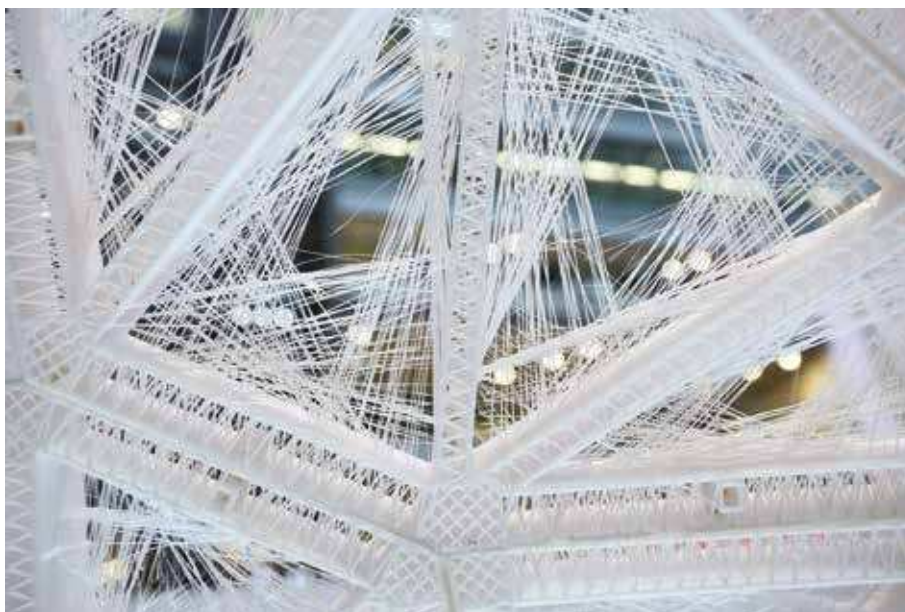


Fig. 66 (a fianco).
Dettaglio dei conci
“svuotati” del VULCAN
Pavilion (© Laboratory
for Creative Design).



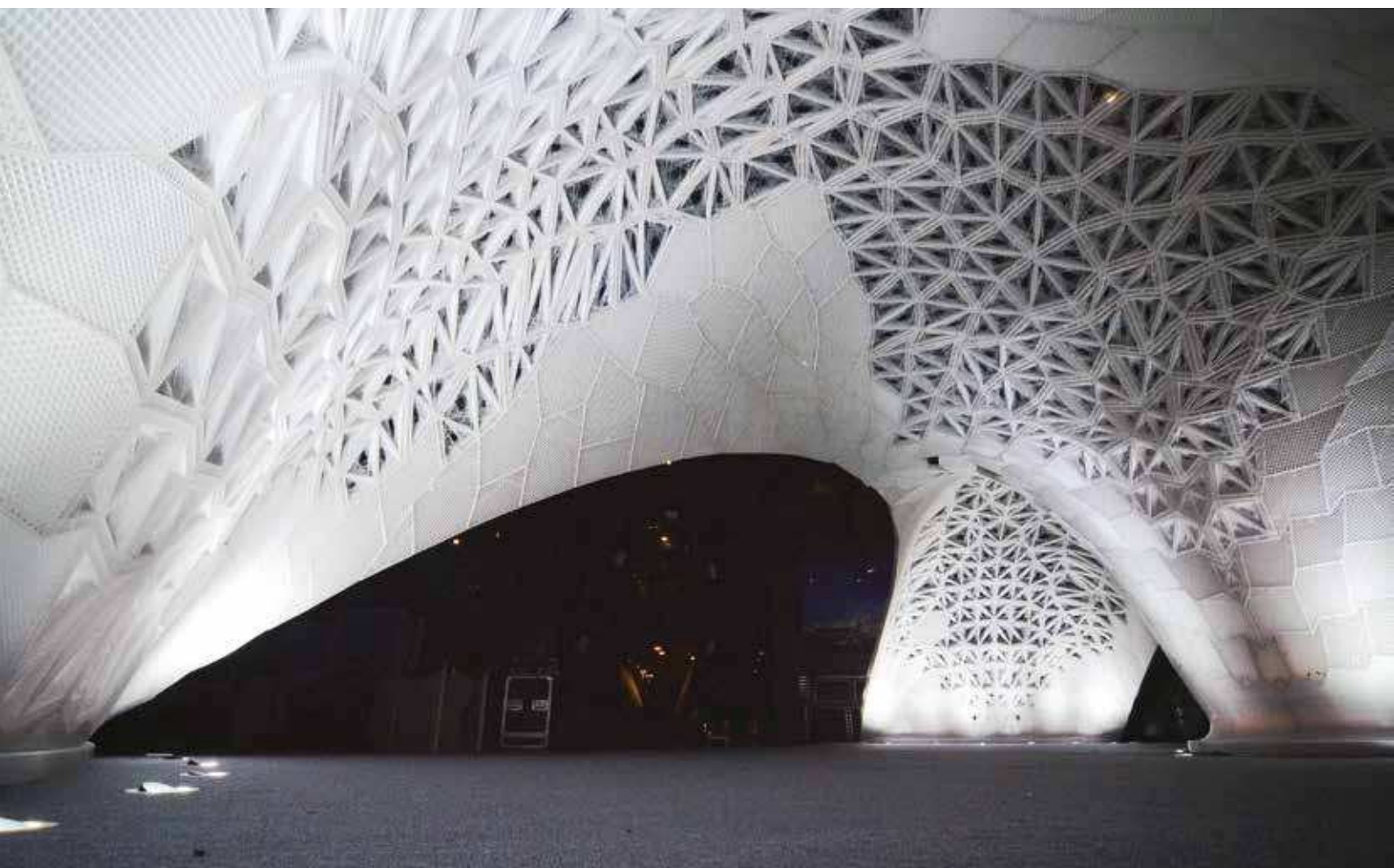
Fig. 67 (in basso). Il
VULCAN Pavilion (©
Laboratory for Creative
Design).

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 5. Additive Manufacturing e stereotomia



5.2.2. DE:STRESS Pavilion

Il DE:STRESS Pavilion è un prototipo realizzato da un team guidato da due architetti, Christopher Battaglia e Martin Miller – afferenti rispettivamente alla Ball State University di Muncie (Indiana, USA) e alla Cornell University di Ithaca (New York, USA) – su commissione di un ente privato, Exhibit Columbus.

Si tratta di un padiglione progettato come una *shell* totalmente compressa, coprente una luce massima di 12 m, una minima di 5 m, avente un'altezza di 3 m e composta da centodieci blocchi forati al centro, ottenuti tramite stampa 3D LDM.

Nello specifico, è stata adottata una tecnica di fabbricazione messa a punto da un team di ricercatori americani di cui Battaglia fa parte. Tale tecnica è denominata Sub-Additive Concrete Printing Method perché, in realtà, combina fabbricazione sottrattiva e additiva. Questo processo è stato concepito per poter stampare con malte fluide oggetti a doppia curvatura. Come si è già spiegato, la tecnologia LDM non permette di impiegare supporti: per questo, il Sub-Additive Concrete Printing Method prevede di sagomare un letto di sabbia tramite macchine CNC, in modo che esso segua la conformazione non planare dell'oggetto e, successivamente, possa fungere da base per la stampa. L'uso della sabbia fa sì che il calco sia, di fatto, totalmente riutilizzabile e che non venga sprecato materiale⁹⁷. Le prime sperimentazioni, miranti alla realizzazione di piccoli padiglioni dimostrativi, hanno evidenziato la necessità di una notevole postproduzione dei pezzi fabbricati, soprattutto in corrispondenza dei giunti, i quali richiedevano la rimozione delle imperfezioni che impedivano una perfetta aderenza dei blocchi adiacenti⁹⁸.

Nel caso del DE:Stress Pavilion, anziché sagomare solo la base, sono stati

⁹⁷ Battaglia, C., Miller M., Verian, K., *DE:Stress Pavilion. Print-Cast Concrete for the Fabrication of Thin Shell Architecture*, in Yablonina, M., Marcus, A., Doyle, S., del Campo, M., Ago, V., Slocum, B., *ACADIA 2020: Distributed Proximities, vol. II: Projects*, Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) (Online, 24-30 Ottobre 2020), 2020, pp. 203-207.

⁹⁸ Zivkovic, S., Battaglia, C., *Rough Pass Extrusion Tooling. CNC Post-processing of 3D-Printed Sub-additive Concrete Lattice Structures*, in *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* (Mexico City, Messico 18-20 ottobre 2018), 2018, pp. 302-311.

Figg. 68-69 (alla pagina precedente). Il VULCAN Pavilion (© Laboratory for Creative Design).

scavati dei veri e propri stampi per i conci utilizzando un braccio robotico a sei assi che plasmava la sabbia umida.

Sostituendo il mandrino del braccio robotico con un ugello è stato possibile adoperare la stessa macchina per la parte di fabbricazione additiva. Il cemento è stato disposto *layer* dopo *layer* all'interno degli stampi, usando l'*over-extrusion*⁹⁹ per premere il materiale contro le pareti delle casseforme e fare in modo che fosse seguito precisamente il profilo dei giunti, così che non fosse necessaria postproduzione.

I conci, aventi tutti geometrie diverse, sono stati progettati per funzionare tramite mutuo incastro e migliorare la prestazione statica della struttura.

Il processo di assemblaggio ha previsto l'uso di una centina linea a *raffle* e, dopo che tutti i blocchi sono stati correttamente posizionati, dei cavi di acciaio in tensione sono stati posti all'estradosso per migliorare il

Figg. 70-72. Il Sub-Additive Concrete Printing Method (© Christopher Battaglia, Martin Miller, Kho Verian).

⁹⁹ L'*over-extrusion* avviene quando la stampante estrude troppo materiale. In alcuni casi, come in questo, può essere indotta volontariamente aumentando la pressione o il flusso in fase di stampa.



comportamento a compressione della struttura¹⁰⁰.

Alla luce di quanto descritto, il DE:Stress Pavilion può essere considerato una stereotomica, poiché risponde sia all'invariante prefigurativo – la superficie della *shell* è stata suddivisa in conci che generano un'apparecchiatura ben precisa – sia all'invariante tecnico-geometrico – ogni singolo concio è geometricamente ben definito – sia all'invariante statico – l'equilibrio meccanico è stato assicurato.

L'analisi di questo prototipo permette di riflettere su alcune questioni. Innanzitutto l'*additive manufacturing* si è dimostrata particolarmente adatta alla fabbricazione di questa struttura grazie alle sue possibilità di customizzazione: anche in questo caso, come in quello di Vulcan, la vasta gamma di blocchi differenti avrebbe diversamente richiesto un'ingente quantità di materiali di risulta per la costruzione di stampi. Gli stessi progettisti sostengono che questa modalità di fabbricazione ha consentito di avere una produzione di scarti di malta inferiori all'1% del totale impiegato e un generale consumo di materiale ridotto del 60% rispetto a un metodo di costruzione tradizionale¹⁰¹.

A fronte di questo vantaggio, è doveroso evidenziare come la costruzione per elementi discreti di spazi voltati stereotomici porti con sé anche una serie di svantaggi: il processo di assemblaggio ha richiesto l'uso di una centina lignea che avrà certamente impattato sul costo complessivo dell'opera, oltre ad aver comportato un importante consumo di risorse. Inoltre la geometria complessa e la necessità di una precisione elevata nei giunti è stata raggiunta con un processo che ha previsto non solo l'utilizzo di macchinari complessi, ma anche la combinazione di due processi di fabbricazione differenti: quello sottrattivo e quello additivo. Questo per sottolineare come a una riduzione della quantità di forza lavoro richiesta – si è occupato della fabbricazione un team di 2-4 persone nel corso di tre mesi¹⁰² – corrisponde anche una necessità di *skills* e di un *know-how* molto più specifici.

¹⁰⁰ Battaglia, C., Miller M., Verian, K., op. cit.

¹⁰¹ Ibid.

¹⁰² Ibid.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte seconda

Cap. 5. Additive Manufacturing e stereotomia



5.2.3. *Striatus Bridge e Phoenix*

Lo Striatus Bridge è un piccolo ponte pedonale progettato da Zaha Hadid Architects e dal Block Research Group ed esposto a Venezia in occasione della XVII Biennale di Architettura, nel 2021.

Si tratta di una struttura totalmente compressa dalla geometria fluida, costituita da conci in cemento stampati in 3D e assemblata senza l'uso di armature di rinforzo né di malta.

Il ponte, che presenta cinque punti di appoggio, è caratterizzato da una configurazione individuata tramite un algoritmo di *form finding* volto a garantire il funzionamento a compressione della struttura. La discretizzazione in conci – in totale cinquantatré – è stata effettuata avendo cura di mantenere i giunti sempre ortogonali alla direzione degli sforzi di compressione, proprio come avviene negli archi, ottimizzando il comportamento statico. Non si è trattato dell'unico accorgimento per migliorare la performance strutturale del ponte: diversamente dai padiglioni precedentemente descritti, infatti, Striatus non presenta una layerizzazione dei conci parallela all'andamento della *shell*, ma la stampa 3D è avvenuta mantenendo gli strati anch'essi sempre ortogonali all'andamento degli sforzi di compressione. I *layer*, dunque, non risultano tutti paralleli, ma cambiano giacitura in relazione al variare della curvatura della volta e la quantità di materiale depositato varia in base alla effettiva distanza reciproca dei *layer* in ciascun punto.

Ciò ha richiesto un processo di stampa complesso, attraverso l'uso di software diversi dai comuni *slicer* e di un braccio robotico a sei assi.

Un altro accorgimento interessante ha riguardato l'ottimizzazione del percorso di stampa: per evitare imperfezioni dovute all'arresto e alla



Fig. 73 (alla pagina precedente, in alto). La fase di assemblaggio del DE:Stress Pavilion (© Christopher Battaglia, Martin Miller, Kho Verian).

Fig. 74 (alla pagina precedente, in basso). Il DE:Stress Pavilion (© Christopher Battaglia, Martin Miller, Kho Verian).

Fig. 75. La fase di stampa di uno dei conci dello Striatus Bridge (© in3d).

ripartenza dell'ugello nel passaggio da un *layer* all'altro, si è fatto in modo di creare un *path* continuo. Poiché è stato necessario rinforzare i conci tramite un *infill*¹⁰³, la superficie all'intradosso è caratterizzata dalle striature dovute al pattern seguito dall'ugello. Proprio a queste striature è legato il nome del padiglione.

Per la posa in opera è stata necessaria una combinazione tra impalcature metalliche modulari e una grande centina di tipo *waffle*, che ha certamente impattato notevolmente sui costi e sulla produzione di materiali di risulta. Dopo l'assemblaggio di tutti i conci – sia quelli del ponte vero e proprio sia quelli del parapetto – sono state disposte le scale, realizzate in legno. L'attacco a terra è stato risolto con delle spalle metalliche collegate a dei plinti di fondazione in calcestruzzo.

È stato possibile per la scrivente vedere personalmente la struttura e fare alcune considerazioni in merito.

Si è notato un difetto piuttosto importante nei giunti: i conci non aderivano perfettamente ma mostravano una divergenza evidente non colmata con

Fig. 76. La fase di assemblaggio dello Striatus Bridge (© Tom van Mele).

Fig. 77-78 (alla pagina seguente). Lo Striatus Bridge (© Naaro).

¹⁰³ Nel campo della stampa 3D il termine “infill” indica il riempimento dell'oggetto da produrre. Difficilmente, infatti, si producono modelli pieni, ma essi vengono di solito svuotati secondo una percentuale ritenuta idonea. Anche in questo caso i conci dello Striatus Bridge non sono conci pieni, ma si è scelto di lasciare delle cavità interne affinché fossero più leggeri. Seppur la soluzione più semplice da un punto di vista esecutivo sarebbe stata quella di stampare solo il perimetro dei conci, i progettisti hanno ritenuto opportuno mantenere un *infill* interno che garantisse una rigidità adeguata dei blocchi.





l'uso di malte poiché la struttura è stata montata interamente a secco. Si è cercato di compensare con dei cuscinetti in gomma, che però non sono risultati sufficienti perché, non essendo ancorati alle facce dei conci, tendevano a distaccarsi. Questo problema potrebbe essere stato causato dalle deformazioni in fase di asciugatura e ha creato degli scompensi a livello strutturale. Le facce laterali dei conci, infatti, non aderivano alla perfezione, ma presentavano zone di contatto puntuali, che non hanno garantito l'equa distribuzione dei carichi e hanno provocato varie fessurazioni. Ciò non ha compromesso la tenuta del ponte sul momento, ma avrebbe potuto rappresentare una criticità nel caso in cui la struttura fosse dovuta rimanere in esposizione più a lungo.

Questo tipo di problematica osservata sullo Striatus Bridge è stata presa in considerazione per uno dei prototipi descritti, all'interno di questa tesi, il Da Vinci's Bridge.

Successivamente il Block Research Group e il comparto CODE di Zaha Hadid Architects hanno ripreso il progetto dello Striatus Bridge insieme all'azienda incremental3D e all'Holcim Innovation Center di Lione e nel 2023 hanno realizzato nella città francese una struttura analoga. Si tratta di uno "Striatus Bridge 2.0", come viene definito dallo stesso Block Research Group, ed è stato chiamato Phoenix.

Phoenix ha un impianto planimetrico molto simile a Striatus, ma presenta in elevato pendenze molto minori, in modo da evitare di utilizzare i gradini. Inoltre, diversamente da Stratus, è stato concepito come struttura permanente.

Esso è stato suddiviso in più blocchi rispetto a Striatus – forse per aumentare in controllo della forma dei singoli pezzi – ed è stato realizzato con un calcestruzzo ecologico messo a punto da Holcim, il quale ha permesso di reimpiegare parte del cemento dei blocchi di Striatus e ha prodotto, secondo le stime, il 25% in meno di emissioni di CO₂.

Si è anche cercato di ridurre al minimo la produzione di materiale di scarto legato al sistema di centine: anche in questo caso si sono combinate impalcature metalliche modulari con porzioni di centina *waffle*, piuttosto che realizzare l'intera struttura di sostegno in legno.

La posa in opera dei conci è partita dal centro del ponte ed è proseguita verso i sostegni di base: in corrispondenza dei giunti a terra è stata aggiunta della malta per compensare lo spazio di risulta legato alle deformazioni dei conci.



Fig. 79 (a fianco).
Phoenix durante la
rimozione del sistema
di centine (© Block
Research Group).

Fig. 80 (in basso).
Phoenix (© Block
Research Group).



5.2.4. Hexastone

Hexastone è un padiglione progettato dai professori Michael Hermann e Benjamin Spaeth della Technische Hochschule Lübeck e realizzato in collaborazione con l'azienda Vertico – specializzata in stampa 3D in calcestruzzo – in occasione della fiera Nordbau 2023.

Ancora una volta si tratta di una *shell* totalmente compressa, coprente un diametro di circa 4,5 m e la cui geometria – in questo caso a base triangolare – è stata ottenuta tramite un algoritmo di *form finding*. Essa è stata successivamente suddivisa in conci esagonali, i quali sono stati mantenuti planari per facilitare il processo di stampa.

Tutti i blocchi sono stati stampati in calcestruzzo con una struttura “a bicchiere”, cioè mantenendo il fondo chiuso e procedendo, poi, con la stampa della sola superficie perimetrale. I pezzi sono stati disposti con la concavità rivolta verso il basso, quasi a formare dei cassettoni.

Le basi del tripode sono state collegate a dei cavi di acciaio in tensione congiunti al centro del padiglione: essi avevano lo scopo di annullare le spinte della volta e mantenere la struttura in equilibrio.

Anche in questo caso per l'assemblaggio si è dovuta impiegare una centina lignea a *waffle*.

La struttura è stata concepita per essere smontabile: i conci lavorano a compressione e la malta è stata usata solo come riempitivo per compensare eventuali discrepanze in corrispondenza dei giunti. Per questa ragione si è scelta una malta non adesiva, che impedisse l'insorgere di tensioni di trazione e che potesse essere facilmente rimossa.

Anche in questo caso sono ravvisabili tutte e tre gli invarianti caratterizzanti una volta stereotomica.

La tematica dei “cassettoni 2.0” è una tematica preponderante anche in due dei prototipi alla cui realizzazione ha partecipato la scrivente – la Stereotomic Green Vault e lo Stereotomic Tripod – e che saranno descritti più avanti in questa tesi, seppur la loro realizzazione sia stata precedente o contemporanea rispetto a quella del padiglione tedesco.

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVI ciclo, Novembre 2020 - Gennaio 2024
Curriculum: Costruzione





PARTE TERZA

MARMOMAC MEETS ACADEMIES

curator:
Giuseppe Falgaux

coordinator:
Alessandro Angione, Ilaria Cavalieri, Mario Costantino
financial support:
Kia Gasparini

INTRODUCTION

The exhibition is a journey through the history of the Marmomac Group, from its origins in the 1950s to the present day. It is a journey that explores the evolution of the company's products and the role of the Marmomac Group in the Italian design scene. The exhibition is divided into three main sections: the first section is dedicated to the company's history, the second section is dedicated to the company's products, and the third section is dedicated to the company's role in the Italian design scene.

RESEARCH AND LITIC EXPERIMENTATION

The exhibition is a journey through the history of the Marmomac Group, from its origins in the 1950s to the present day. It is a journey that explores the evolution of the company's products and the role of the Marmomac Group in the Italian design scene. The exhibition is divided into three main sections: the first section is dedicated to the company's history, the second section is dedicated to the company's products, and the third section is dedicated to the company's role in the Italian design scene.

The exhibition is a journey through the history of the Marmomac Group, from its origins in the 1950s to the present day. It is a journey that explores the evolution of the company's products and the role of the Marmomac Group in the Italian design scene. The exhibition is divided into three main sections: the first section is dedicated to the company's history, the second section is dedicated to the company's products, and the third section is dedicated to the company's role in the Italian design scene.



Capitolo 6

Introduzione ai dimostratori

Nel diciassettesimo secolo inizia a prendere forma il metodo scientifico, a partire dal pensiero di Cartesio e di Galileo Galilei. Questa procedura, che è tutt'ora utilizzata, mira a validare un'ipotesi attraverso esperimenti che siano replicabili da altri studiosi. Il risultato finale stabilisce se l'ipotesi iniziale sia vera o no.

L'architettura è una disciplina a metà strada tra la scienza e l'arte e, per questa ragione, è impossibile utilizzare il metodo scientifico in questo campo. Infatti è spesso difficile provare univocamente la bontà di un output progettuale, poiché la componente artistica, in contrasto con l'oggettività, fa in modo che lo stesso prodotto possa essere giudicato diversamente da persone diverse in base al loro *background* personale. Perciò è impossibile stabilire se un oggetto architettonico o di design rappresenti la soluzione migliore a un determinato bisogno, tuttavia si può dimostrare che esso sia effettivamente realizzabile e se ne può migliorare l'efficienza attraverso la costruzione di prototipi.

Dunque, le discipline dell'architettura e del design non possono basarsi esclusivamente su questioni teoriche e simulazioni digitali, ma devono essere strettamente legate a un approccio pratico, fatto di prove e test miranti a valutarne aspetti estetici, statici e funzionali. Può accadere che un oggetto perfettamente modellato in digitale risulti di difficile fabbricazione o mostri altri tipi di problemi una volta prodotto concretamente. In questi casi è necessario modificare il progetto fino a quando il prodotto finale può essere considerato adeguato.

Alla luce di quanto detto, il processo di realizzazione di un prototipo non può essere paragonato a un esperimento condotto usando il metodo scientifico, dato che esso non conduce a un risultato finale inequivocabile, in grado di confermare o confutare l'ipotesi iniziale. Di fatto il prototipo rappresenta uno step dell'iter progettuale, che serve a individuare pro e contro del manufatto al fine di apportare migliorie e ottenere il miglior risultato, dimostrandone anche la costruibilità.

È questo il vantaggio di usare modelli fisici come dimostratori ed è questa la ragione per cui questa tesi di dottorato, dalla vocazione fortemente sperimentale, ha fin dall'inizio puntato a una forte interconnessione tra teoria e pratica. Proprio per via dell'approccio scelto, basato sul concetto di *learning by doing*, la scrivente si è personalmente impegnata a partecipare alla produzione dei prototipi che verranno di seguito descritti, ossia la *Stereotomic Green Vault*, lo *Stereotomic Tripod* e il *Da Vinci's Bridge*.

6.1. La fase di training iniziale

Dato già un bagaglio di conoscenze nel campo della modellazione tridimensionale tradizionale e parametrica, si è intrapreso un ulteriore percorso di *training* finalizzato ad acquisire le nozioni base di stampa 3D, come i criteri con cui effettuare lo *slicing*, regolare l'*infill*, impiegare i supporti anche a seconda dei diversi materiali impiegati. Ciò è stato utile per avere ben chiari i principi per modellare e ottimizzare i modelli 3D dei dimostratori affinché fossero stampabili.

Inoltre si sono effettuate una serie di esperienze pratiche per imparare a utilizzare la stampante Delta WASP 3 mt, in modo da poter partecipare attivamente anche alla fase di fabbricazione di uno dei prototipi (lo Stereotomic Tripod). Questa fase, seppur circoscritta a un solo macchinario, ha comunque arricchito il bagaglio di conoscenze della scrivente con alcune nozioni di carattere generale e, pertanto, applicabili anche ad altre stampanti (l'importanza della temperatura del piatto di stampa, la calibrazione, la modifica manuale di alcuni parametri a stampa avviata, ecc.).

Di seguito si descriverà parte di questo percorso di *training* attraverso due esperienze che, pur non conducendo alla realizzazione di un vero e proprio prototipo, sono state fondamentali per acquisire più padronanza della stampa 3D di grandi dimensioni.

6.1.1. La realizzazione di due rocchi di una colonna di design

La prima parte del *training* pratico è servita per prender confidenza con la Delta WASP 3 mt e con possibili errori e difficoltà riscontrabili durante una stampa di grandi dimensioni. Ciò si è concretizzato con delle prove di modellazione e stampa di alcuni rocchi di una colonna concepita apposta per questa fase di ricerca. Si tratta di una colonna dalle forme fluide caratterizzata da una simmetria triangolare. Essa è stata ottenuta tramite un codice Grasshopper creato per ottenere, a partire da alcune circonferenze di base date, dei tubolari che si torcessero in maniera irregolare anziché seguendo una spirale semplice. Una volta ottenuta la geometria desiderata, si è ripetuta per tre volte intorno a un centro, ottenendo tre lobi che si intersecassero a vicenda nella parte bassa e si separassero in sommità, creando tre “guglie”. Il primo risultato ottenuto è mostrato nella figura

83. Si è effettuata una prima prova di stampa per una porzione di colonna tagliata a partire dal basso. Essa è stata svuotata manualmente lasciando una chiusura superiore e inferiore. Si è usata la stampante Delta WASP 3 mt con l'estrusore per il pellet di PLA, che presenta un ugello di 3 mm, dopo aver effettuato lo *slicing* con il software Simplify3D sfruttando i parametri forniti dalla stessa WASP.

Tuttavia, data l'inesperienza, non si è tenuto conto degli sbalzi eccessivi, perciò nella fase iniziale della fabbricazione è emerso che fosse impossibile stampare senza supporti a causa dell'instabilità degli strati di materiale (figg. 84-85).

Fig. 83 (a fianco). Schema quotato del primo modello di colonna sviluppato.

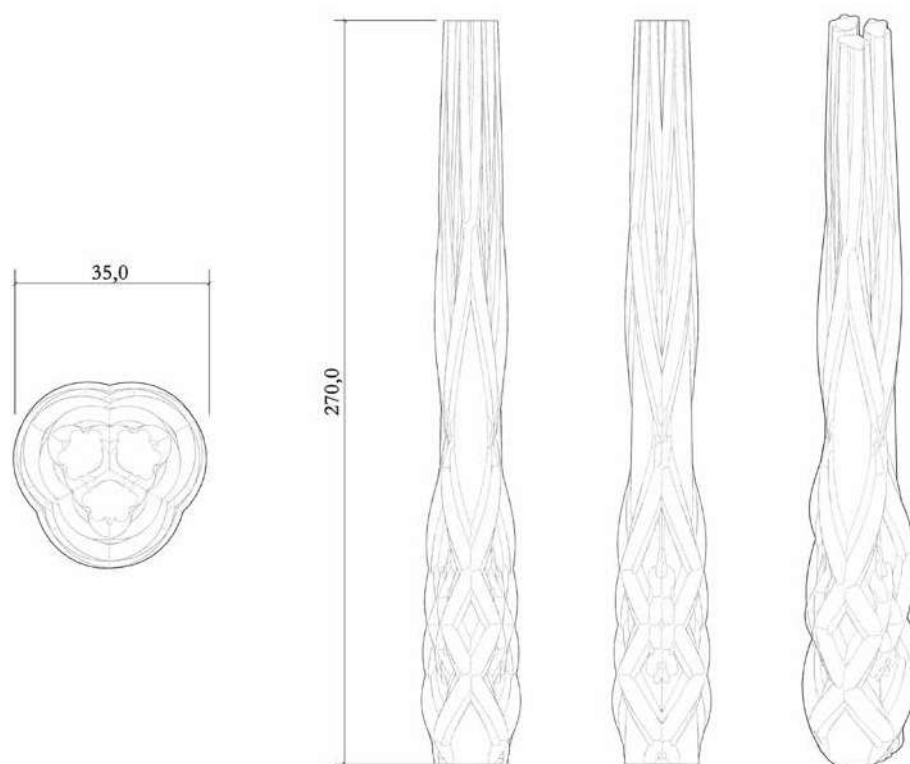


Fig. 84-85 (in basso). Fotografie del primo provino stampato, in cui è evidente il cedimento dei layer per via degli sbalzi eccessivi della geometria.



Non volendo usare i supporti per evitare una postproduzione eccessiva, si è deciso di ricalibrare la geometria della colonna. Tutti i tubolari sono stati rimodellati e riposizionati in modo che i rilievi sulla superficie della colonna fossero inferiori. Prima di avviare la stampa si sono ricontrollati tutti sbalzi attraverso dei piani di sezione per verificare che nessuno superasse i 45° – valore limite per stampare senza supporti in PLA – e si è suddiviso l'elemento in rocchi, ciascuno compatibile con il volume di stampa e con il giunto posizionato in corrispondenza di segni già dati dallo sviluppo del pattern superficiale, per renderli meno impattanti visivamente.

Si è effettuata una prova di stampa per il secondo rocchio, il più alto. Piuttosto che svuotare a mano il modello, lo si è impostato cavo direttamente nel software *slicing*, scegliendo di mantenere tre perimetri esterni – per uno spessore complessivo di 9 mm – con quattro strati di *top* e *bottom* – gli strati di chiusura superiori e inferiori – e riducendo l'*infill* a zero. Questa seconda prova di stampa ha permesso di fare altre valutazioni. Innanzitutto il pezzo è risultato troppo grande e il pellet nel serbatoio non è stato sufficiente al completamento dell'oggetto. Questo tipo di errore si può evitare rabboccando periodicamente il serbatoio, ma ciò impone un costante controllo della macchina e impedisce di avviare eventualmente una stampa notturna. Inoltre la porzione realizzata presenta

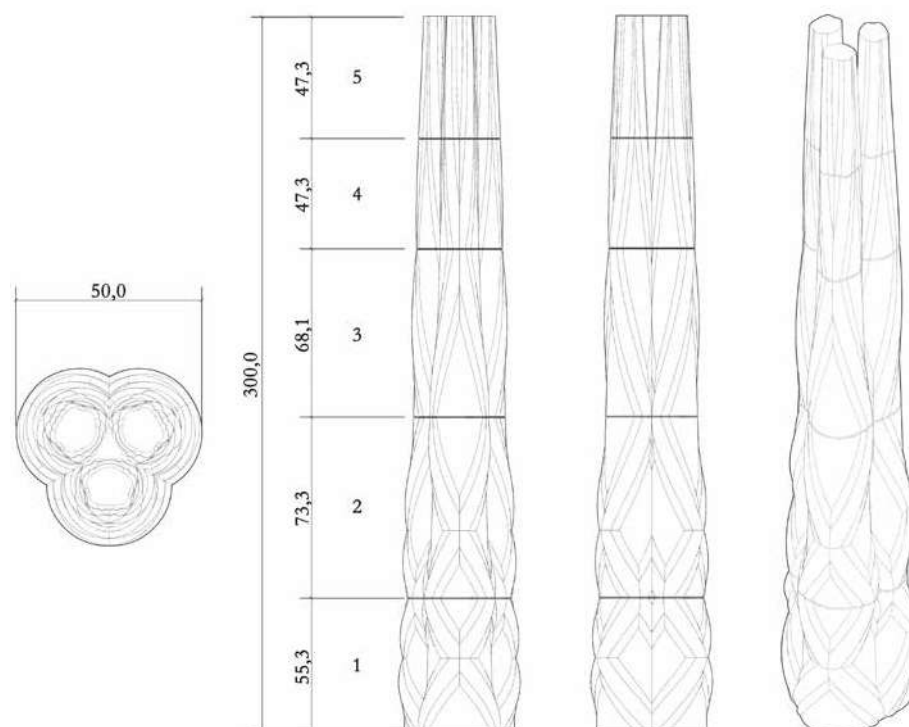
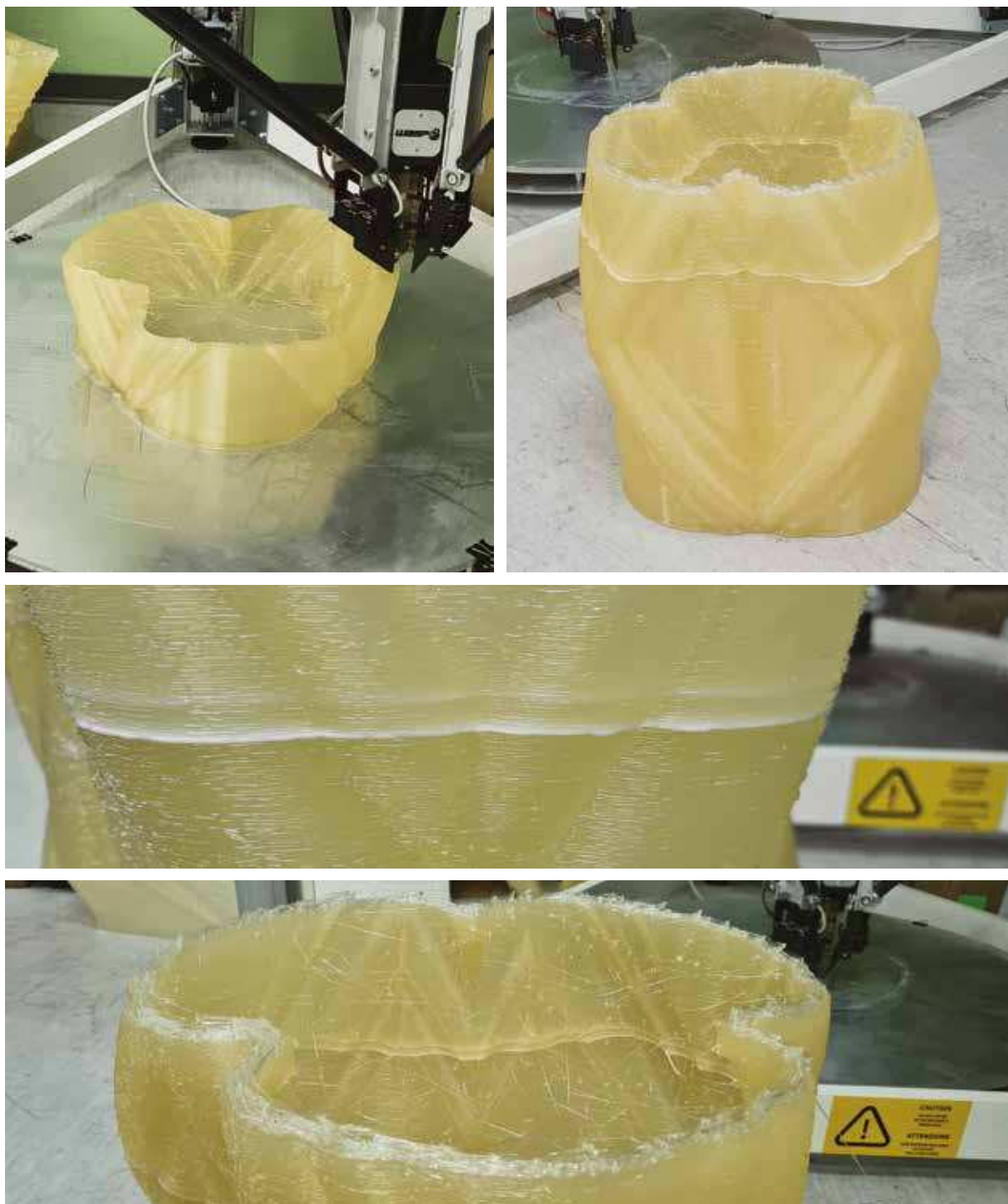


Fig. 86. Schema quotato del secondo modello di colonna sviluppato, suddiviso in cinque rocchi.

Figg. 87-90. Fotografie della stampa fallita. sono visibili la striatura bianca e il bordo superiore del concio rovinato per via dell'interruzione.

un difetto: una striatura orizzontale bianca dovuta, probabilmente, a un residuo di colorante bianco precedentemente utilizzato e rimasto dentro il serbatoio. Se anche la stampa fosse stata completata, il pezzo sarebbe stato compromesso (figg. 88-89). Si è, dunque, ritenuto opportuno ridurre la dimensione dei blocchi per aumentare il controllo sulla stampa: non solo



per poter gestire meglio la quantità di pellet nel serbatoio, ma anche per evitare sprechi eccessivi di materiale in caso di errori.

Si è, quindi, suddivisa la colonna in maniera più fitta, facendo in modo che i rocchi non superassero mai i 50 cm di altezza.

Stavolta si è lavorato su due pezzi: il rocchio di base e uno dei tre blocchetti che costituiscono l'ottavo rocchio.

In questo caso, durante la fase di *slicing*, si sono eliminati anche gli strati di *top* e *bottom*.

Tale scelta è stata fatta per ridurre lo spreco di materiale, ipotizzando che i giunti tra i rocchi potessero essere resi più stabili incollando i conci a delle piastre metalliche tagliate a laser secondo il perimetro della sezione.

In entrambi i casi il primo tentativo ha portato a un distaccamento dal piatto di stampa, che si è risolto al secondo tentativo aumentando la temperatura del piatto stesso. Nel caso del primo rocchio ciò è stato provocato dall'area di base troppo larga, che ha subito il riscaldamento disomogeneo del piatto. Nel caso della porzione dell'ottavo rocchio, invece, è stato provocato dalla dimensione ridotta della base. Riassumendo, questa prima esperienza è servita ad avere dimestichezza con alcuni dei problemi che possono nascere durante una stampa di grandi dimensioni, come la gestione dello *slicing*, il controllo della quantità di materiale, la calibrazione delle dimensioni dei blocchi ai fini di un'ottimizzazione della produzione.

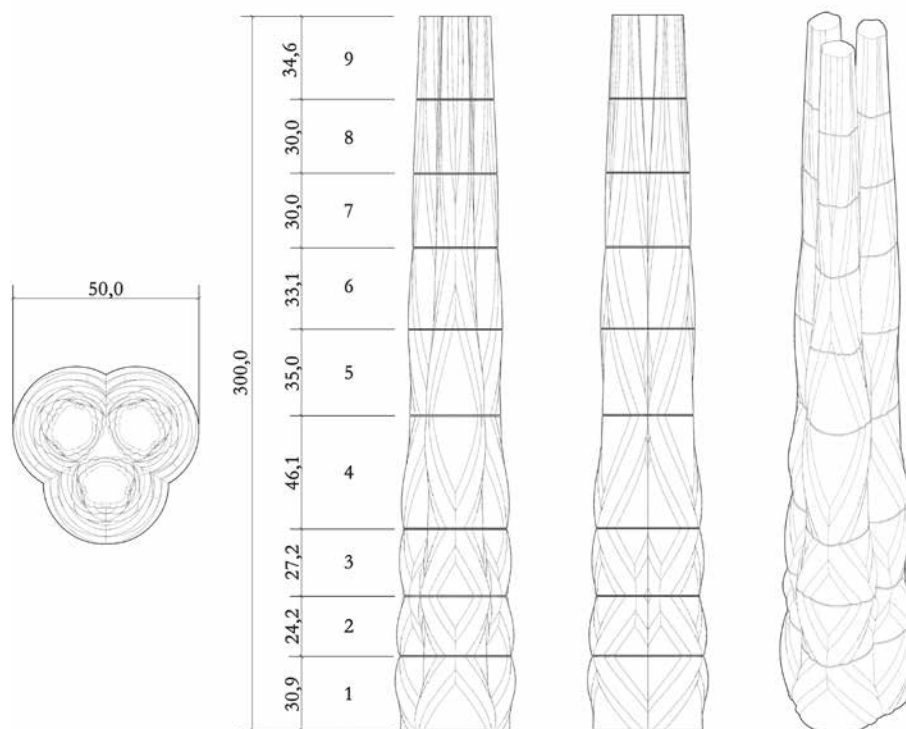


Fig. 91. Schema quotato del terzo modello di colonna sviluppato, suddiviso in nove rocchi.

Figg. 92-98 (alla pagina seguente). Fotografie della stampa del primo rocchio e della porzione dell'ottavo rocchio. In entrambi i casi sono stati riportati anche le stampe fallite, con i difetti legati allo spostamento dell'oggetto sul piatto di stampa.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 6. Introduzione ai dimostratori

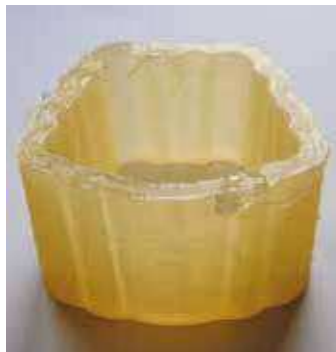




Fig. 99. Rendering della colonna completa.

6.1.2. La realizzazione di una porzione di maquette del Ponte sul Basento di Sergio Musmeci

La seconda esperienza è consistita in alcune prove di stampa per la realizzazione di una porzione in scala del Ponte sul Basento di Sergio Musmeci. È servito sia come esercizio per la stampa di forme complesse – il ponte sul Basento presenta la geometria di una superficie minima¹⁰⁴ – sia per provare un nuovo materiale. L'azienda Eumakers¹⁰⁵, infatti, ha fornito del pellet di PLA additivato con gesso al fine di valutarne la stampabilità e la bontà. Innanzitutto si sono dovuti effettuare dei test con questo materiale per capire i valori ottimali da attribuire ai vari parametri. Si è partiti dai settaggi di WASP per il pellet classico e ci si è concentrati soprattutto sulla temperatura dell'ugello – quella del piatto è stata mantenuta a 50 °C

Fig. 100. Il Ponte sul Basento di Sergio Musmeci, Potenza, 1971-1976 (© Rivista Inarcassa).

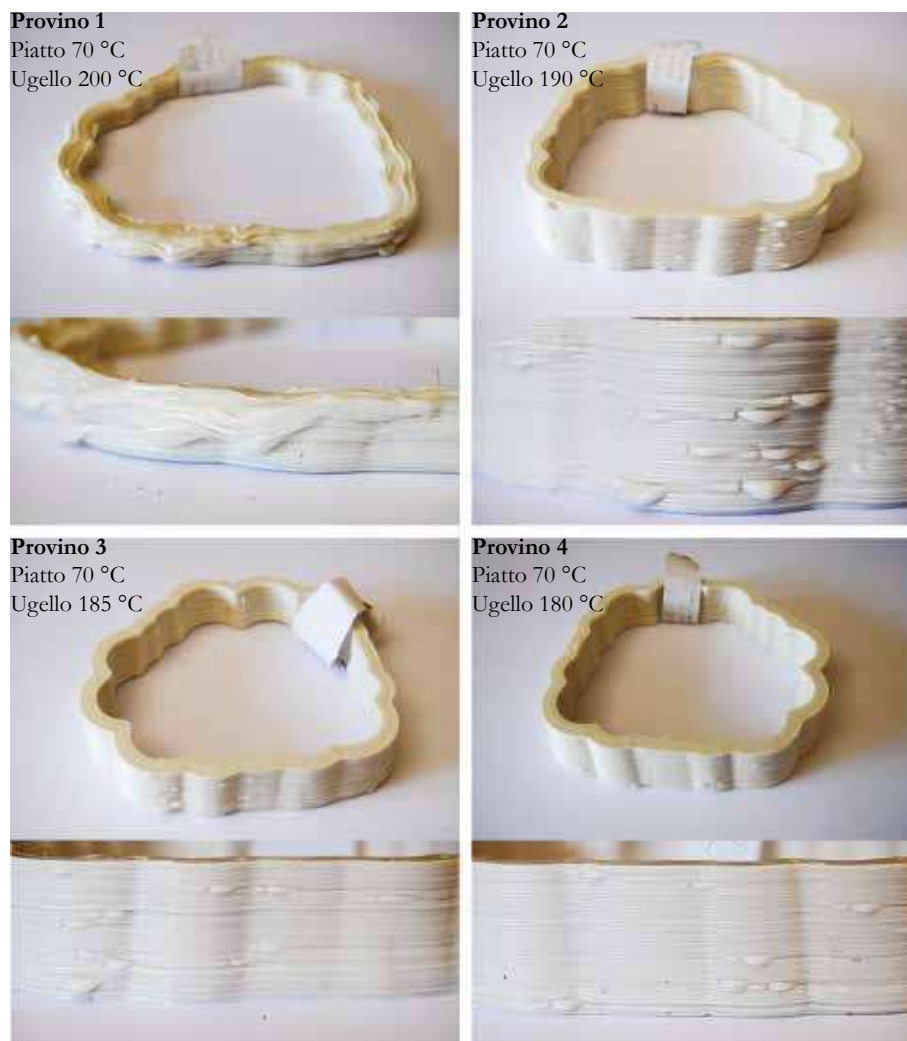
¹⁰⁴ Le superfici minime sono quelle superfici che, dati dei bordi, occupano lo spazio tra essi con la minima area possibile. Esse si comportano in maniera analoga ai film saponosi e sono state studiate, in passato, dall'architetto Frei Otto e dall'ingegnere Sergio Musmeci.

¹⁰⁵ <https://www.eumakers.com/>.



– stampando svariati provini con temperature progressivamente inferiori, partendo da 200 °C – la temperatura con cui viene stampato il pellet classico. Questa temperatura è risultata eccessiva, tanto da compromettere la geometria del provino, perciò si è scesi di 5 °C alla volta fino ad arrivare a 180 °C, quando il risultato è stato giudicato ottimale (figg. 101-104).

Si è provato a mitigare un altro difetto, ossia i rigonfiamenti sparsi per la superficie dei provini e dovuti alla colatura eccessiva di materiale nel momento in cui l'ugello si arresta per passare al *layer* successivo. Un problema della stampa del pellet di PLA, infatti, è che il materiale continua a scorrere leggermente anche quando la macchina non sta estrudendo. Nel caso del filamento in PLA, quando il *nozzle* si arresta il filamento viene ritratto – la velocità di questo movimento è definita *retraction speed* – e viene bloccato finché non riprende l'estrusione. Nel caso del pellet, invece, i grani vengono fatti scendere nell'ugello tramite una vite rotante e,



Figg. 101-104. I provini ottenuti modificando la temperatura dell'ugello.

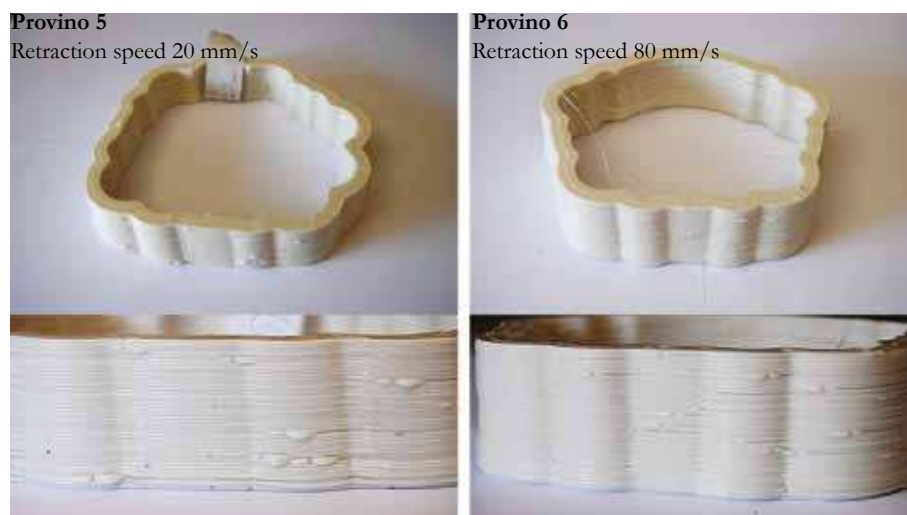
anche quando questa si ferma, possono comunque scivolare nel condotto, venendo fusi e colando fuori dal *nozzle*.

Questo è il motivo per cui le stampe effettuate con pellet presentano uno *stringing*¹⁰⁶ molto evidente. L'effetto dei grumi, tuttavia, è stato mitigato aumentando il valore della *retraction speed*, per cui l'ugello ripartiva la sua corsa subito dopo aver finito un *layer*, senza dare il tempo al materiale di colare in quantità eccessiva. Dopo aver quadruplicato questo valore – da 20 mm/s a 80 mm/s –, si è ottenuto un risultato che, seppur ancora imperfetto, era più accettabile (figg. 105-106).

Una volta calibrati tutti i parametri, si è passati all'ottimizzazione della stampa del modello. La maquette era racchiusa all'interno di un volume parallelepipedo di 218×88×71 cm ed è stata suddivisa in quattro blocchi tramite tagli verticali, come mostrato nella figura 107. In realtà si sarebbe potuto stampare il modello suddividendolo in soli due pezzi, che sarebbero stati comunque contenuti nel volume di stampa, tuttavia, sulla base di quanto appreso precedentemente, si è evitato di fabbricare blocchi che superassero i 50 cm di altezza. Inoltre, ciascuna metà del ponte avrebbe presentato una geometria molto complessa che avrebbe richiesto parecchi supporti e, anche per questo motivo, si è preferito scomporla ulteriormente a metà, ottenendo due porzioni più facilmente gestibili.

Prima di avviare la stampa si sono fatte alcune considerazioni circa il

¹⁰⁶ Nel gergo usato per la stampa 3D, il termine *stringing* indica la formazione di piccoli fili di plastica, che ricordano una ragnatela e rappresentano un inestetismo per l'oggetto finito.



Figg. 105-106. I provini ottenuti modificando *retraction speed*..

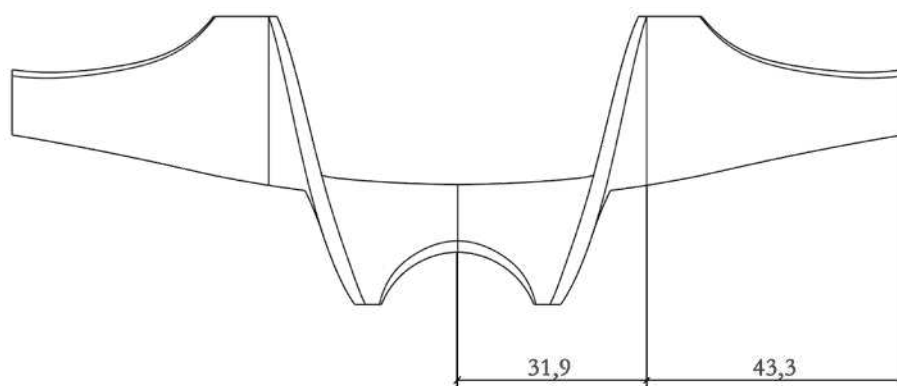


Fig. 107. Schema della suddivisione in pezzi del modello.

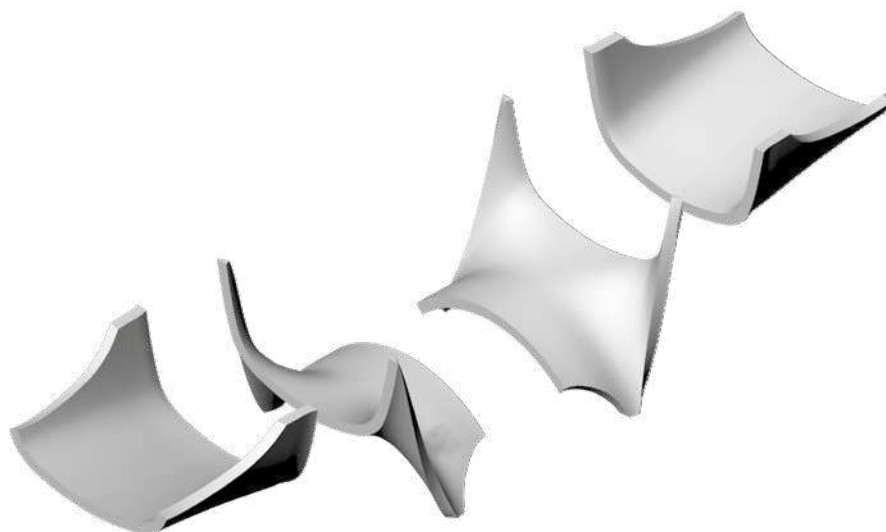


Fig. 108. Esploso del modello.

posizionamento migliore di ciascun pezzo sul piatto. A tal proposito si è considerata la regola del “THEY”, mostrata nella figura 109. Si tratta di un insieme di semplici norme per garantire la stampa ottimale degli oggetti, prendendo come esempio le lettere che compongono la parola “THEY” e mostrando in che modo debbano essere disposte per ottenere un buon risultato, massimizzando la superficie a contatto col piatto – in maniera da ridurre le possibilità di distaccamento – e minimizzando la quantità di supporti.

I pezzi del ponte, a due a due identici, sono stati posizionati nel piatto come mostrato nella figura 110: quelli più esterni – le “ali” – sono stati sistemati in modo da avere la superficie più grande al contatto col piatto e da non avere necessità di alcun sostegno; i due pezzi centrali, invece, sono stati disposti per avere non solo la massima superficie di base, ma anche la minima quantità di supporti. A parità di aggetto, infatti, la soluzione scelta fa in modo che lo sbalzo si trovi più in basso, perciò i supporti da realizzare hanno un volume inferiore.

Fig. 109 (a fianco).

Schema della regola del “THEY” (tratto dal volume *Advanced 3D printing with Grasshopper. Clay and FDM* di Diego García Cuevas e Gianluca Pugliese).

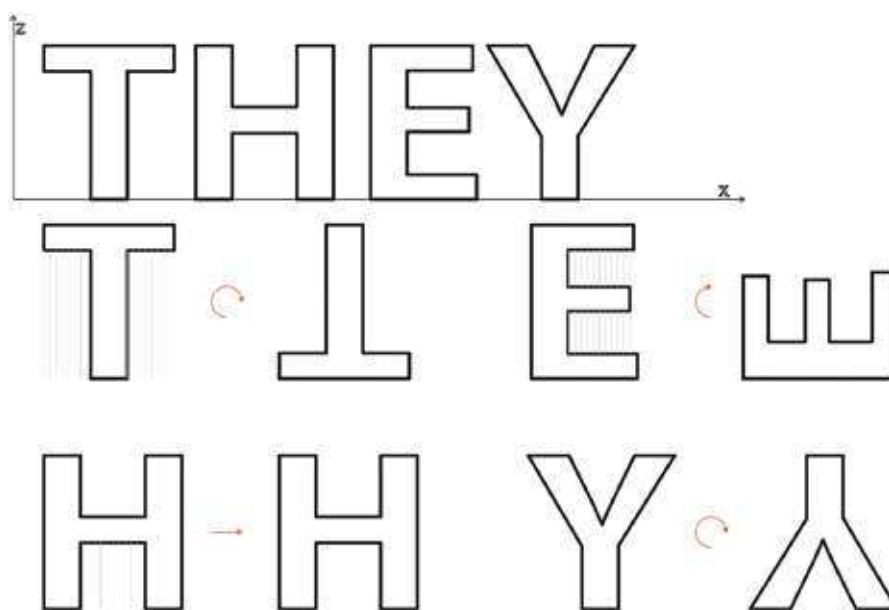


Fig. 110 (in basso).

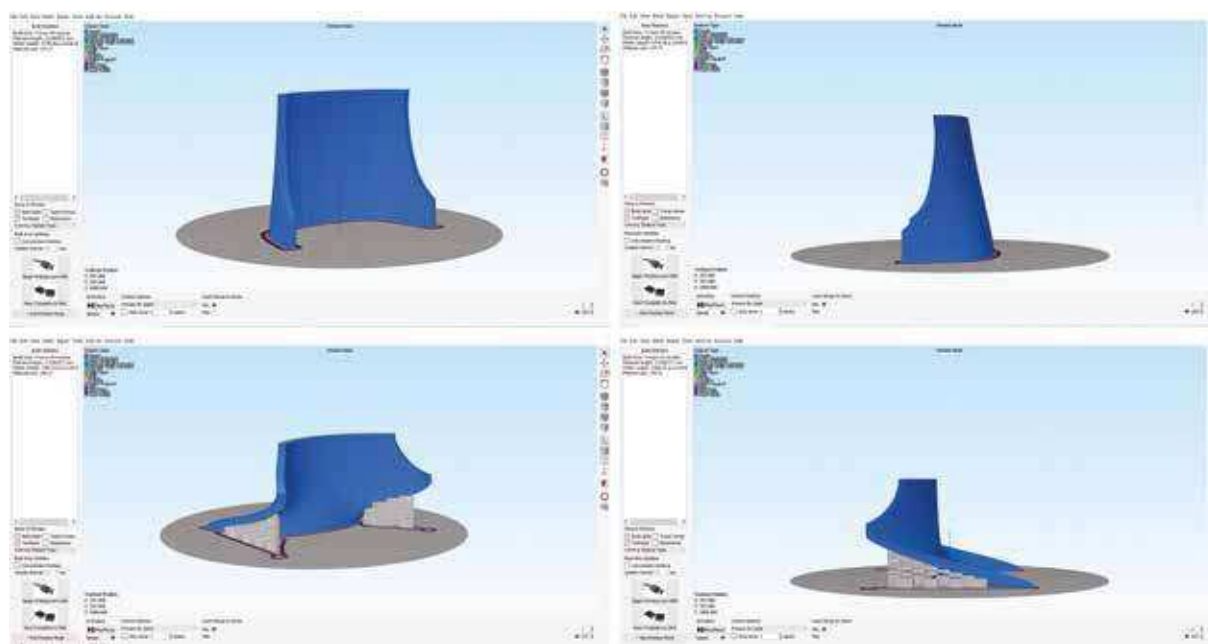
Schermate di Simplify3D che mostrano il posizionamento dei pezzi sul piatto di stampa e lo slicing effettuato.

Figg. 111-112 (alla pagina seguente). Fotografie di una delle ali stampata.

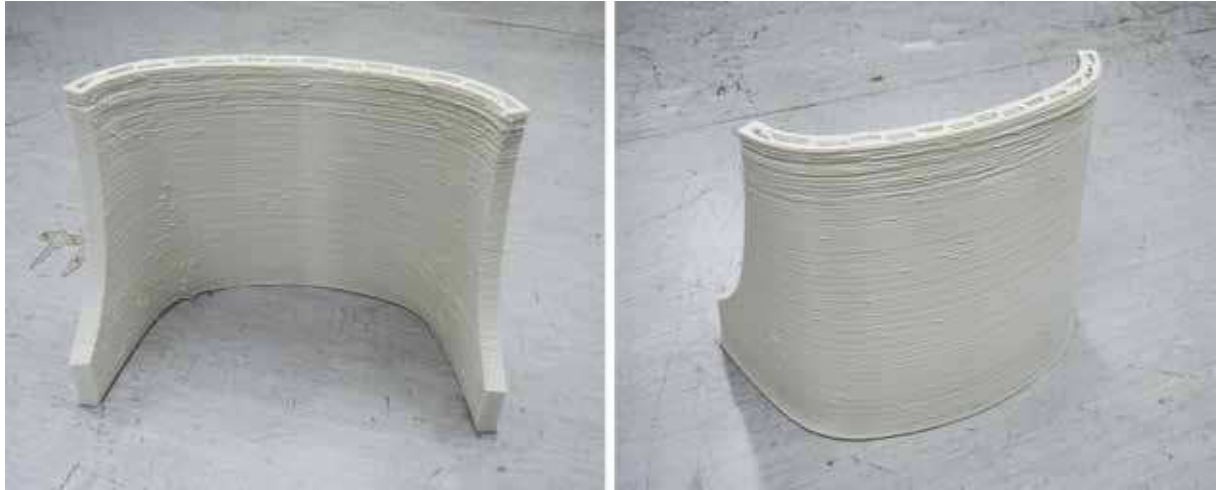
Fig. 113 (alla pagina seguente). Rendering della trancie del ponte in versione lapidea, immaginata da Giuseppe Fallacara come una scrivania.

Purtroppo si è riusciti a stampare solo una delle due “ali”, poiché il pellet additivato con gesso si è mostrato, a lungo andare, inadatto alla stampa: l’ugello è stato totalmente ostruito ed è stato impossibile proseguire.

Nonostante questo inconveniente, questa esperienza è stata molto utile per fare pratica nel modificare i parametri di stampa e migliorare l’esito finale e per interfacciarsi con geometrie più complesse, ragionando sul modo migliore per realizzarle.



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVI ciclo, Novembre 2020 - Gennaio 2024
Curriculum: Costruzione



Capitolo 7

Una proposta per spazi cassettonati innovativi

Come già specificato all'inizio di questa tesi, lo scopo principale della ricerca consiste nel proporre un aggiornamento della disciplina stereotomica tramite l'utilizzo della fabbricazione additiva, tecnologia che può consentire di introdurre nuove possibilità formali e costruttive.

Un primo ragionamento riguarda la possibilità di creare volte cassettonate innovative, provando a fornire una reinterpretazione di quelle barocche attraverso l'impiego di elementi realizzati tramite stampa 3D.

È doveroso specificare che durante il periodo Barocco i cassettoni non erano elementi portanti, ma esclusivamente decorativi. In virtù di questo, potrebbe sembrare che non sussista un legame con la disciplina stereotomica, tuttavia una correlazione può essere individuata partendo proprio dall'etimologia della parola *stereotomia*, emersa dalle ricerche passate svoltesi nella facoltà di Bari e, in particolare, dagli studi del prof. Fallacara sull'argomento. Come già spiegato nel secondo capitolo, la parola *stereotomia* ha la stessa radice di *stereoma*, ossia *luogo delle stelle fisse*, e nelle rappresentazioni antiche del mondo tabernacolo le stelle erano disposte sullo stereoma secondo geometrie ben precise.

Queste configurazioni regolari della volta celeste sono state fonte di ispirazione per le ricerche geometriche sui cassettoni per gli spazi voltati, che venivano progettati con la volontà di rappresentare il luogo e la disposizione perfetta delle stelle¹⁰⁷. Volendo ragionare in maniera figurata, si potrebbe asserire che “stereo”, possa fare riferimento anche al “taglio dello spazio” oltre che al taglio della pietra, poiché le volte cassettonate venivano disegnate applicando le regole della geometria proiettiva che sono proprie anche della disciplina stereotomica.

Inoltre i cassettoni contribuivano a un generale alleggerimento visivo di strutture tradizionalmente “massive”, basti pensare alla cupola della basilica di San Carlo alle Quattro Fontane (fig. 114), progettata da Borromini e di cui Paolo Portoghesi, all'interno della sua monografia dedicata al celebre architetto, parla in questi termini:

«Nei catini absidali e nella cupola [...] il cassettonato convergente proiettato sui piani curvi serve insieme a “slontanare” e ad alleggerire, a dare all'involucro il valore di membrana nervata. [...]»

¹⁰⁷ Fallacara, G., *Stereotomia e rappresentazione del mondo*, in Fallacara, G., Minenna, V., *Stereotomic Design. Catalogo della mostra omonima per Inside Marmomacc & Abitare il Tempo Veronafiere, Verona 2014*, Maglie, Edizioni Gioffreda, 2014, pp. 17-30.

L'obiettivo è «offrire alla luce che viene dalle finestre alte della cupola superfici morbide e spigoli netti, moltiplicati per produrre un effetto di animazione della materia che diventa vibrante e sensibile come una pelle»¹⁰⁸.

Un possibile processo di aggiornamento degli spazi voltati potrebbe consistere, quindi, nel portare all'estremo l'alleggerimento della superficie stereotomica ipotizzando di riprendere la conformazione dei cassettoni, svuotandoli e creando strutture totalmente trasparenti, costituite da conci cavi che, diversamente dai cassettoni barocchi, si comportino allo stesso tempo da elementi strutturali e da apparato decorativo.

A proposito della trasparenza e dell'importanza della luce nella determinazione di uno spazio architettonico, si possono nuovamente citare le parole di Paolo Portoghesi, che si è espresso sull'argomento durante l'ultima intervista fattagli dal prof. Fallacara nella sua casa di Calcata¹⁰⁹.

«Io ho sempre considerato la luce la materia fondamentale dell'architettura, quindi poterla manovrare con destrezza e poterla manovrare per esprimere emozioni e sentimenti diventa più facile quando si possiede una tecnologia che ha fatto della trasparenza uno dei suoi temi fondamentali. Questa trasparenza è importantissima, perché contribuisce a valorizzare lo spazio, a umanizzarlo [...]. Poter modellare la luce in modo tale da plasmare lo spazio, non soltanto in un punto attraverso un raggio che arriva, ma attraverso una generalità di trasparenze che possono, appunto, essere tali da esprimere perfettamente la variazione della luce durante le ore del giorno, questa è la cosa più bella: quando si crea un'architettura per la luce la si crea in funzione di un continuo cambiamento. [...] Un'architettura fondata sulla luce è qualcosa che vive e, quindi, in questo senso si avvicina all'uomo, che è l'essere vivente per eccellenza».

In tal senso la tecnologia della stampa 3D è particolarmente vantaggiosa, poiché dà la possibilità di realizzare oggetti totalmente vuoti, cosa che invece risulterebbe molto più difficile da fare utilizzando i metodi di fabbricazione sottrattiva, o che, comunque, produrrebbe notevoli quantità

¹⁰⁸ Paolo Portoghesi, *Borromini. Vita e Opere*, Milano, Skira, 2019, pp. 113-114.

¹⁰⁹ L'intervista fatta dal prof. Fallacara a Paolo Portoghesi è disponibile al link <https://www.youtube.com/watch?v=Sp1vLPK0dDY>.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi

di materiale di scarto.

In ogni caso, come ogni altra tecnologia, l'*additive manufacturing* presenta vantaggi ma anche svantaggi, che, oltretutto, possono variare a seconda del tipo di materiale e di tecnica impiegata.

Di seguito si riportano due diverse esperienze legate alla realizzazione di due prototipi basati proprio sul principio del cassettone trasparente: si tratta della *Stereotomic Green Vault* e dello *Stereotomic Tripod*.

Fig. 114. Cupola della chiesa di San Carlo alle Quattro Fontane, di Borromini (Roma, 1634-1667).



7.1. Stereotomic Green Vault

7.1.1. Introduzione

Quello della Stereotomic Green Vault è il primo prototipo realizzato nell'ambito della presente ricerca. Si tratta di un progetto portato avanti insieme ad altri due colleghi dottorandi del Politecnico di Bari, Dario Costantino e Angelo Vito Graziano, e la cui realizzazione è avvenuta presso il FabLab Poliba di Bitonto.

Si tratta di un modello di volta a botte ribassata costituito da un pattern di conci osteomorfi reciprocamente incastrati.

Il tema dei blocchi stereotomici osteomorfi è già stato indagato in passato nell'ambito delle ricerche condotte presso il Politecnico di Bari, come nel caso dell'Osteomorphic Catenary Arch (figg. 115-116) – un prototipo in scala reale di arco catenario costituito da conci reciprocamente incastrati –, o della Volta Obliqua Truchet (fig. 117), progettati da Giuseppe Fallacara. Tuttavia si tratta di esempi realizzati in pietra da taglio con l'ausilio di macchine a controllo numerico, che richiedono una lavorazione più complessa per le superfici a doppia curvatura.

L'*additive manufacturing*, invece, non solo rende più semplice realizzare questo tipo di geometria, ma consente anche di ottenere oggetti cavi, che diversamente richiederebbero non solo un processo di fabbricazione estremamente complesso, ma causerebbero anche la produzione di un'ingente quantità di materiale di risulta.



Figg. 115-116.
L'Osteomorphic Catenary Arch e il singolo conco realizzato in marmo realizzato dall'azienda Generelli nel 2015 (© Giuseppe Fallacara).



Fig. 117. Volta Obliqua Truchet, realizzata nel 2007 a Madrid (© Giuseppe Fallacara).

Il termine *green* presente all'interno del nome attribuito al prototipo si riferisce sia all'intenzione di sviluppare questo tipo di sistema per la creazione di spazi voltati verdi – come si vedrà più avanti –, sia al tipo di materiale impiegato, ossia l'argilla. Si tratta, infatti, di un materiale facilmente reperibile in Puglia – quindi a chilometro zero – e che presenta, inoltre, il vantaggio di poter essere re-impastato e riutilizzato se non ancora cotto. Eventuali errori di fabbricazione, dunque, non comportano uno spreco irreversibile di materiale. Oltre che per le sue caratteristiche *green*, si è scelta l'argilla perché il suo utilizzo è ampiamente consolidato nell'ambito delle costruzioni.

7.1.2. Il progetto

Il processo di progettazione è partito dal singolo concio, che è stato ispirato da una serie di riflessioni.

Si è vagliata immediatamente la possibilità offerta dalla stampa 3D di realizzare oggetti cavi in maniera semplice e, dunque, di poter creare strutture estremamente leggere. Nel passato esistevano sistemi costruttivi che prevedevano l'utilizzo di componenti fittili cavi, come i tubuli o

i caroselli. Mentre i tubuli presentavano una forma simile a quella di una bottiglia e venivano impilati tra loro per creare archi che, replicati, permettevano di ottenere spazi voltati, i caroselli avevano forma cilindrica e venivano disposti radialmente rispetto alla curvatura, giustapposti tra loro e immersi in uno strato di malta che garantisse una buona tenuta¹¹⁰ (fig. 118).

Quest'ultima tipologia è ampiamente diffusa soprattutto nei centri storici del Sud Italia – i caroselli sono anche noti, in gergo, come *pignatte bubbole* – (fig. 119) e risulta particolarmente interessante sia perché favorisce un buon isolamento termico dovuto alla presenza di cavità piene d'aria, sia perché all'inizio del Novecento è stata ripresa da un ingegnere italiano, Pasquale Frezza, per la messa a punto di un sistema costruttivo antisismico¹¹¹.

Parallelamente a queste considerazioni si è effettuato un ragionamento sulla finitura dei singoli elementi: i caroselli, che venivano realizzati col tornio,

¹¹⁰ Scuro, C., Tiberti, S., Codispoti, R., Milani, G., Olivito, R. S., *Fictile tubules: A traditional Mediterranean construction technique for masonry vaulted systems*, in *Construction and Building Materials*, n. 193, 2018, 84-96.

¹¹¹ Ibid.

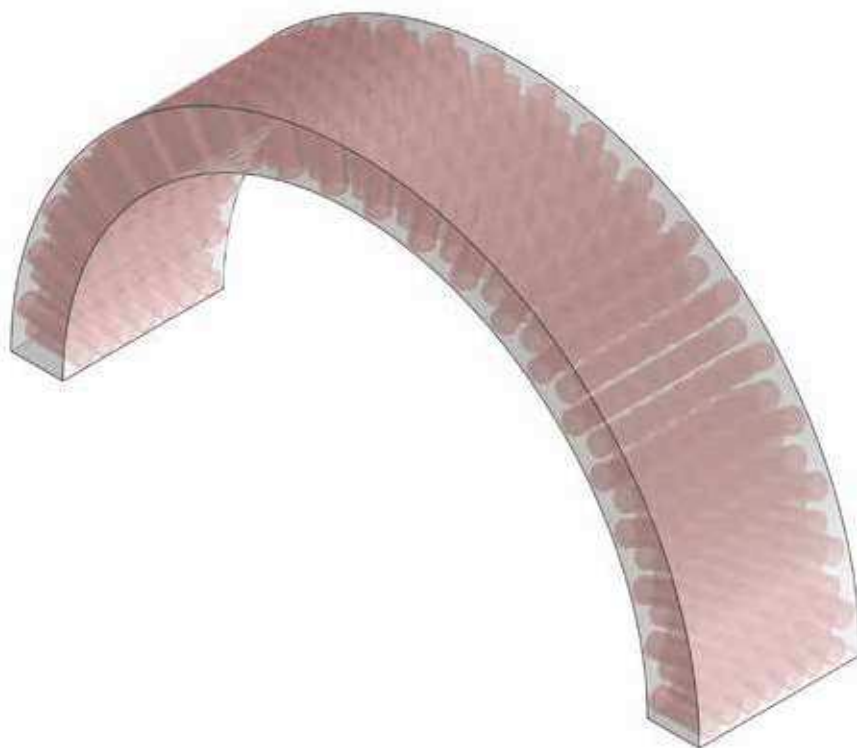


Fig. 118. Schema di una porzione di volta a botte costruita col sistema dei caroselli.

Fig. 119. Una volta realizzata con i caroselli, in un palazzo antico di Acquaviva delle Fonti.



presentavano sulla superficie i segni orizzontali tipici di questa lavorazione, i quali, talvolta, venivano addirittura accentuati tramite appositi strumenti per garantire una migliore aderenza alla malta¹¹². Questa consapevolezza ha immediatamente portato a un parallelismo con la layerizzazione tipica della stampa 3D.

Le strutture voltate realizzate per elementi fittili cavi, tuttavia, non sono di natura stereotomica, poiché sono costituite da elementi standardizzati e non progettati individualmente nell'ottica di un miglioramento statico

¹¹² Ibid.

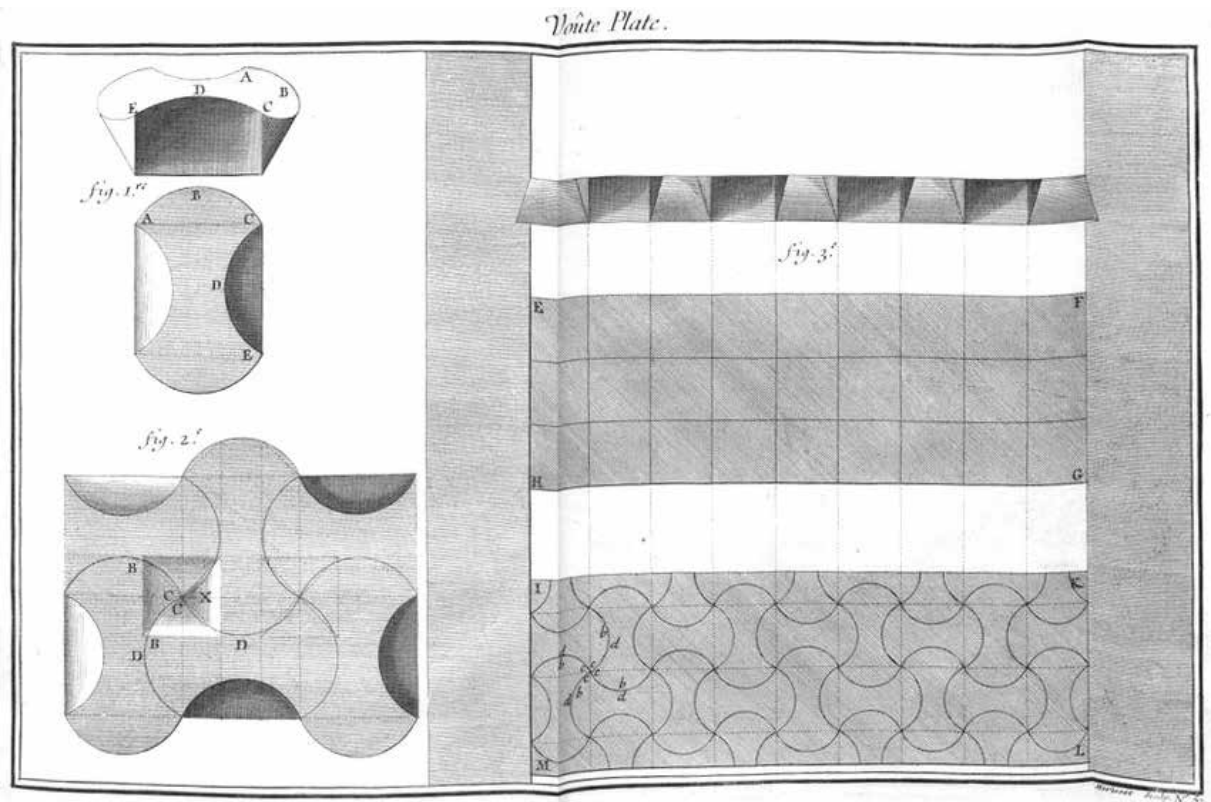


Fig. 120. Disegni del brevetto originale della volta piana di Truchet.

ed estetico. Per questa ragione si è deciso di pensare a una soluzione con mutuo incastro che creasse un pattern di base rettangolare, in cui i conci sono disposti orizzontalmente e verticalmente in maniera alternata, similmente alla trama dei conci di Truchet (fig. 120).

Differentemente da questo tipo di pattern, tuttavia, si è optato per una geometria totalmente fluida, poiché le stampanti delta sono più efficienti nella realizzazione di forme curvilinee piuttosto che spigolose.

Si è partiti da una trama di circonferenze sfalsate, da cui si è ricavato il perimetro di un possibile concio ripetibile nello spazio. Per passare dal bidimensionale al tridimensionale si è dovuto affrontare il tema del mutuo incastro: per poter ottenere blocchi osteomorfi si è copiato il perimetro precedentemente disegnato, spostandolo in verticale lungo l'asse z e ruotandolo di 90°. In questa maniera si sono stabiliti i bordi della faccia superiore e di quella inferiore del concio, che hanno funto da riferimento per la successiva creazione di una superficie di collegamento tramite il comando *loft*. La conformazione 3D ottenuta consentiva il mutuo incastro di conci adiacenti (figg. 121-122).

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi

Fig. 121 (a fianco).

Schema geometrico della
modellazione del concio
osteomorfo.

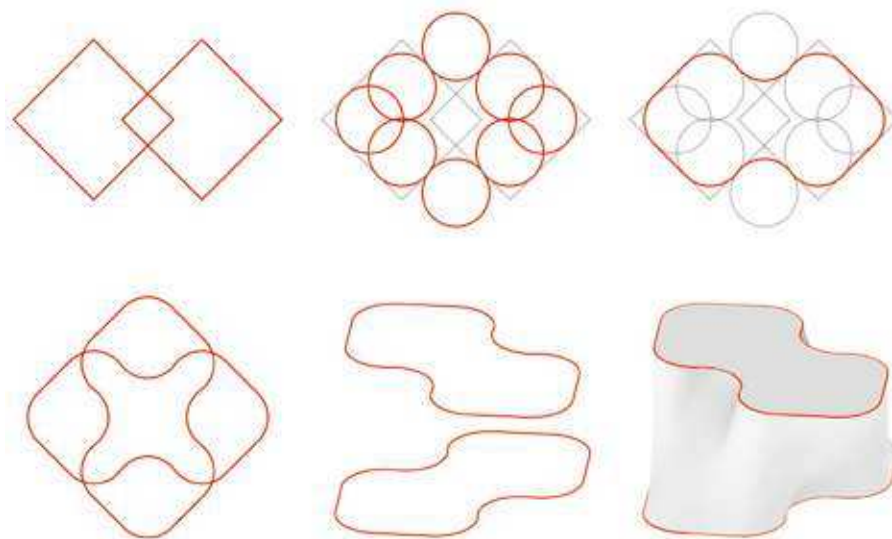
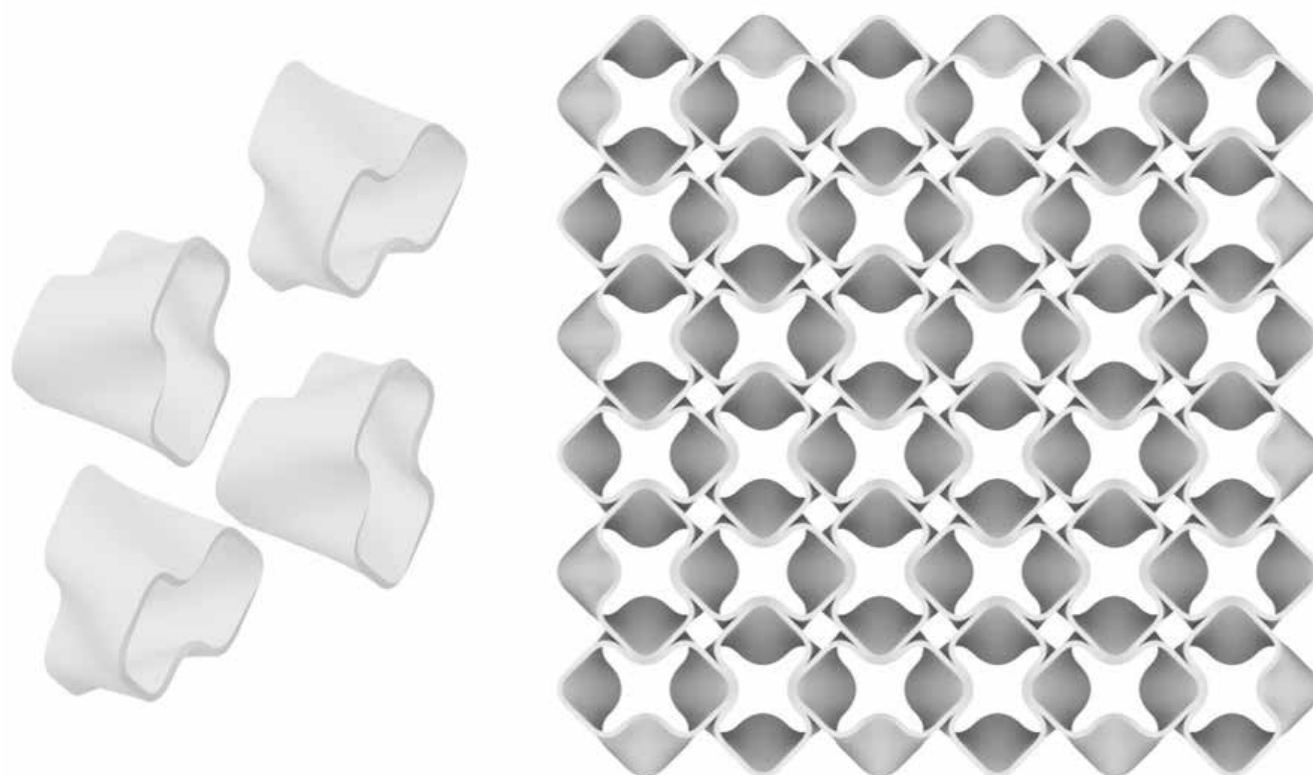


Fig. 122 (in basso).

Schema del pattern
creato dai conci
osteomorfi.



7.1.3. Possibili applicazioni architettoniche

Il processo di progettazione non può non passare attraverso la concezione di uno spazio architettonico vero e proprio o attraverso delle ipotesi di applicazione pratica.

Il sistema di conci precedentemente descritto si presta a differenti possibilità di utilizzo.

Per esempio, se si decide di mantenerlo completamente cavo, si può pensare a un sistema di ombreggiamento, ma si potrebbe anche decidere di chiudere un'estremità del blocco, ottenendo un "bicchiere". In questo caso lo si potrebbe disporre in due modi differenti rispetto allo spazio voltato: con la cavità rivolta verso l'estradosso o verso l'intradosso.

Nel primo caso si potrebbero trattare i conci come "vasi" per la vegetazione, con la possibilità di realizzare vere e proprie volte stereotomiche verdi – da questa idea deriva anche la parola "green" nel nome del prototipo (fig. 123). Chiaramente tale applicazione richiederebbe una serie di accorgimenti per permettere alla struttura di funzionare: innanzitutto bisognerebbe pensare a un sistema di irrigazione che attraversi i conci, presumibilmente passando attraverso dei fori ricavati a posteriori. In secondo luogo si potrebbe pensare di sfruttare simili fori anche per favorire la crescita della vegetazione in modo trasversale, creando un intreccio di radici che funga da armatura verde per la stessa struttura.

Nel secondo caso, invece, si potrebbe ottenere una sorta di volta cassettonata innovativa, in cui i cassettoni sono costruiti dagli stessi elementi portanti che compongono la struttura (fig. 124), in maniera simile a quanto è stato già fatto per Hexastone, di cui si è parlato nel capitolo 6. Inoltre le cavità dei conci potrebbero anche essere sfruttate come alloggiamenti per un ipotetico impianto di illuminazione. Anche in questo caso, ovviamente, bisognerebbe approfondire la progettazione, pensando a un impianto elettrico integrato nel sistema costruttivo.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi



7.1.4. Prototipazione: risoluzione di problemi e ottimizzazione della forma

Ultimata la fase di progettazione preliminare di questo sistema costruttivo, si è passati alla realizzazione del prototipo di concio.

Prima di stampare i conci definitivi già deformati secondo la curvatura della volta a botte, è stato necessario effettuare alcune prove per calibrare correttamente le dimensioni e la geometria del singolo elemento, per scegliere l'ugello con le dimensioni più appropriate e per settare i vari parametri di stampa.

È stata utilizzata una stampante Wasp Clay 40 100, presente presso il FabLab Poliba.

A livello di modellazione 3D si sono prodotti dei semplici solidi chiusi, poiché è possibile regolare direttamente nel software di *slicing* il grado di "svuotamento" dell'oggetto, impostando un *infill* pari a zero.

Inoltre, in questo caso si è ritenuto opportuno stampare utilizzando la *vase mode*, ossia con un singolo strato perimetrale continuo a spirale, per poter stampare ogni blocco senza le imperfezioni dovute all'arresto e alla ripartenza dell'ugello su ciascun *layer*.

Il primo pezzo stampato aveva una dimensione massima di 30 cm e un'altezza di 15 cm e si è scelto un ugello di 6 mm per la realizzazione, impiegando un tempo totale di fabbricazione di venti minuti. Lo *slicing* è stato effettuato tramite il software Simplify3D.

L'elemento finito è quello mostrato nelle figure 125-128.

Come si può notare nelle figure 129-130, la prima prova di stampa non ha portato a un risultato soddisfacente, poiché il concio ha subito deformazioni eccessive in corrispondenza delle zone di massima pendenza.

A tal proposito è doveroso ribadire i limiti presentati dalla stampa 3D LDM: i materiali viscosi rendono pressoché impossibile l'uso dei supporti durante il processo di fabbricazione per via della difficoltà nella loro rimozione dopo l'asciugatura e questo problema, unitamente al fatto che i *layer* non si induriscono subito dopo essere stati stampati, ma restano plastici, può portare a fenomeni di deformazione o addirittura di collasso se la geometria non è calibrata bene. In questo caso non solo la forma presentava sbalzi eccessivi, ma la superficie perimetrale aveva uno spessore troppo sottile rispetto alle dimensioni dell'intero oggetto e ciò ha impedito che i vari strati, aderendo bene tra loro, ostacolassero il cedimento.

Per contrastare queste problematiche si sono prese due contromisure. Innanzitutto si è resa la geometria del concio più compatta: l'altezza si

Fig. 123 (alla pagina precedente, in alto). Rendering di una volta stereotomica verde realizzabile con i conci progettati.

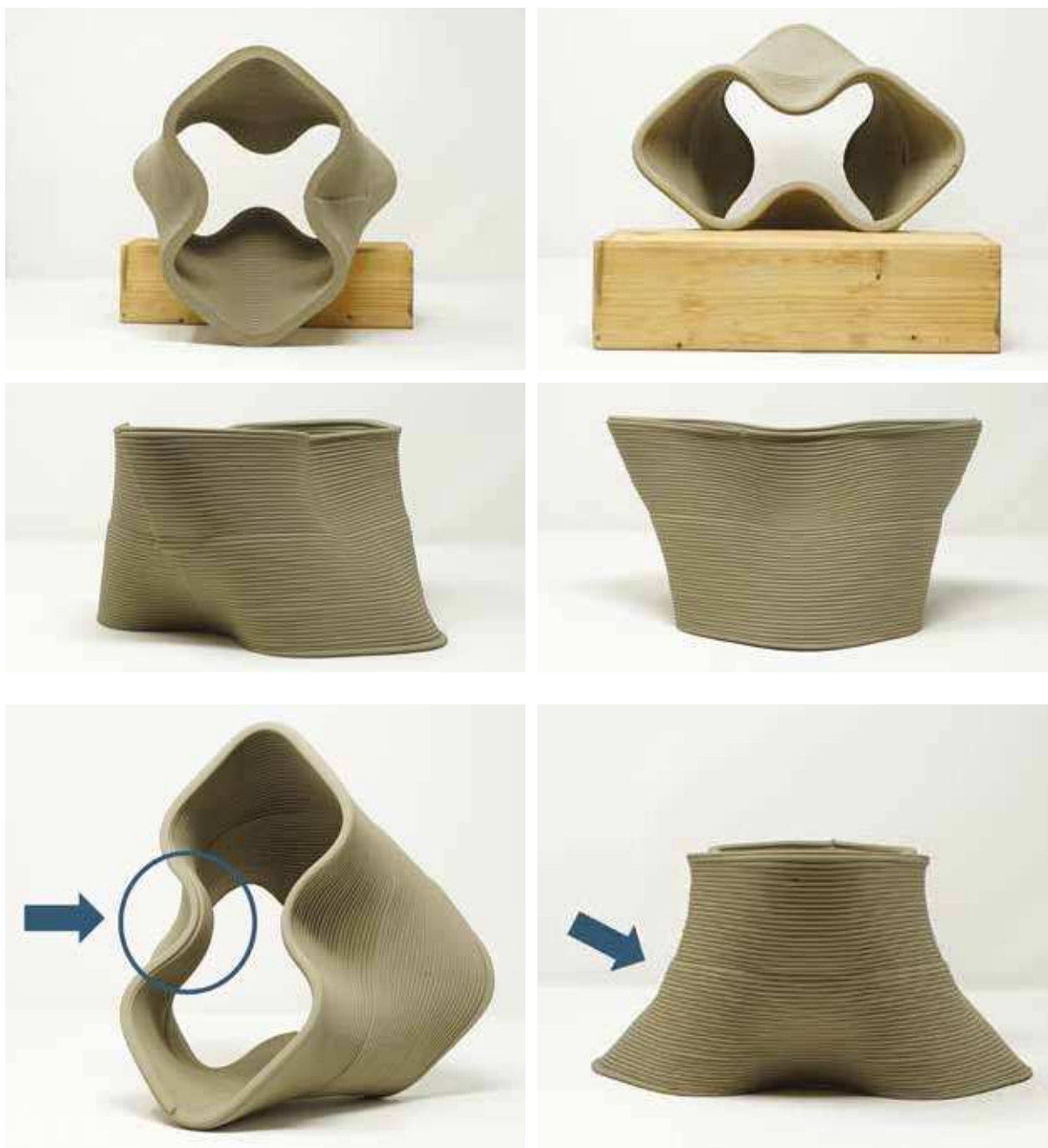
Fig. 124 (alla pagina precedente, in basso). Rendering di una volta stereotomica cassettonata realizzabile con i conci progettati.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi



Figg. 125-128 (in alto).
Fotografie del primo
concio stampato.

Figg. 129-130 (in basso).
Fotografie del primo
concio stampato con le
principali deformazioni
evidenziate.

è ridotta a 10 cm e si è rimpicciolita e ridisegnata la sagoma dei bordi in modo che la dimensione massima misurasse 17 cm e che non ci fosse un restringimento eccessivo nella parte centrale. In questa maniera si è ridotta notevolmente la pendenza della superficie perimetrale (fig. 131).

In secondo luogo, pur mantenendo un ugello da 6 mm, si è leggermente aumentata la pressione in fase di stampa, in modo che lo strato depositato risultasse più spesso (8-10 mm). Tale espediente, chiamato sovraestrusione,

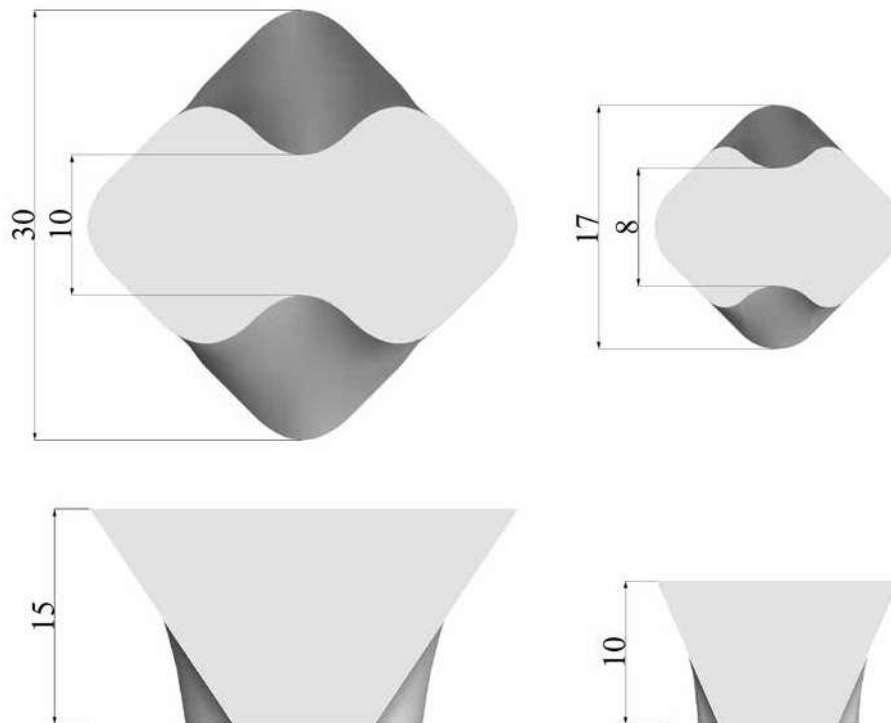


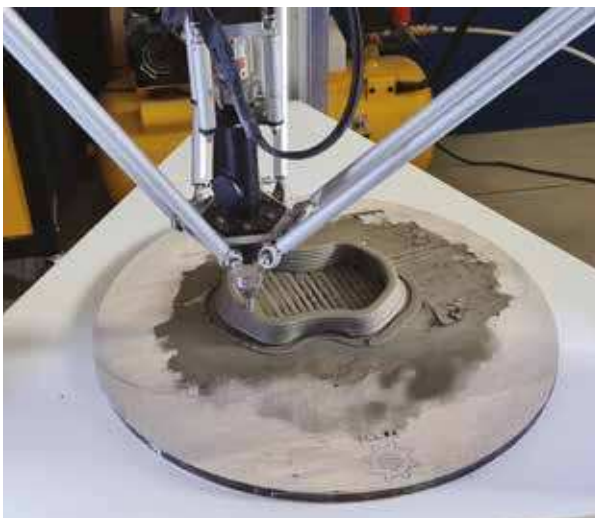
Fig. 131. Schemi quotati del concio prima e dopo la ricalibrazione della geometria.

è stato scelto anche per contrastare il rimpicciolimento dovuto al ritiro in fase di asciugatura.

Il nuovo concio è stato stampato provando a mantenere il fondo pieno, per simulare la possibilità di creare cassettoni o blocchi adatti a ospitare la vegetazione e il processo di fabbricazione ha richiesto otto minuti.

Questa volta la geometria del blocco si è dimostrata adatta alla stampa 3D in argilla, poiché i conci stampati si sono mantenuti compatti, senza deformazioni significative.

Figg. 132-133. Fotografie della stampa dei conci ricalibrati.



Nonostante le pareti laterali del blocco siano state stampate con facilità, il fondo ha presentato alcuni problemi, legati soprattutto alla difficoltà nel creare uno strato totalmente chiuso, poiché non sempre i vari strati di materiale depositato aderivano tra loro correttamente. Si sono sperimentati diversi metodi di stampa del *bottom* (sia a griglia sia concentrico), ma il risultato è sempre consistito in un'eccessiva quantità di conci con difetti di fabbricazione a fronte di quelli stampati correttamente. Tale problema è legato a una non perfetta omogeneità della viscosità del materiale, che provocava costanti variazioni nello spessore del *layer* depositato. La mancata aderenza reciproca degli strati di argilla, inoltre, si è spesso accentuata ulteriormente in fase di asciugatura, a causa del ritiro di materiale (figg. 134-135).

L'opzione di aumentare la sovrastruzione in corrispondenza dei primi due *layer* è stata scartata perché avrebbe portato a un rigonfiamento eccessivo alla base dell'oggetto, compromettendone la forma. Si è, invece, deciso di riprendere a stampare dei conci totalmente cavi, a cui si sarebbe potuto applicare un fondo successivamente.

I nuovi blocchi sono stati stampati sempre con un ugello di 6 mm, impiegando per ciascuno un tempo di sei minuti.

Altre difficoltà che si sono rilevate durante questi test di stampa sono connesse al materiale stesso e dipendono sempre da cambi imprevedibili di densità dell'impasto o dalla presenza di bolle d'aria. Ciò può causare errori di stampa come quelli mostrati nelle figure 136-137. Questo accade soprattutto quando non si ha a disposizione un'impastatrice automatica, ma è necessario impastare manualmente l'argilla, come in questo caso. Ciò impedisce di avere una miscela perfettamente uniforme e priva di bolle d'aria e può rendere più difficoltoso avere controllo sulla stampa.

Come già detto, tuttavia, manufatti in argilla non ancora cotti posso essere re-impastati, limitando notevolmente lo spreco di materiali a causa di difetti di fabbricazione. Inoltre la velocità della manifattura additiva LDM fa in modo che gli sprechi di tempo legati a manufatti non completati correttamente risultino sostenibili.



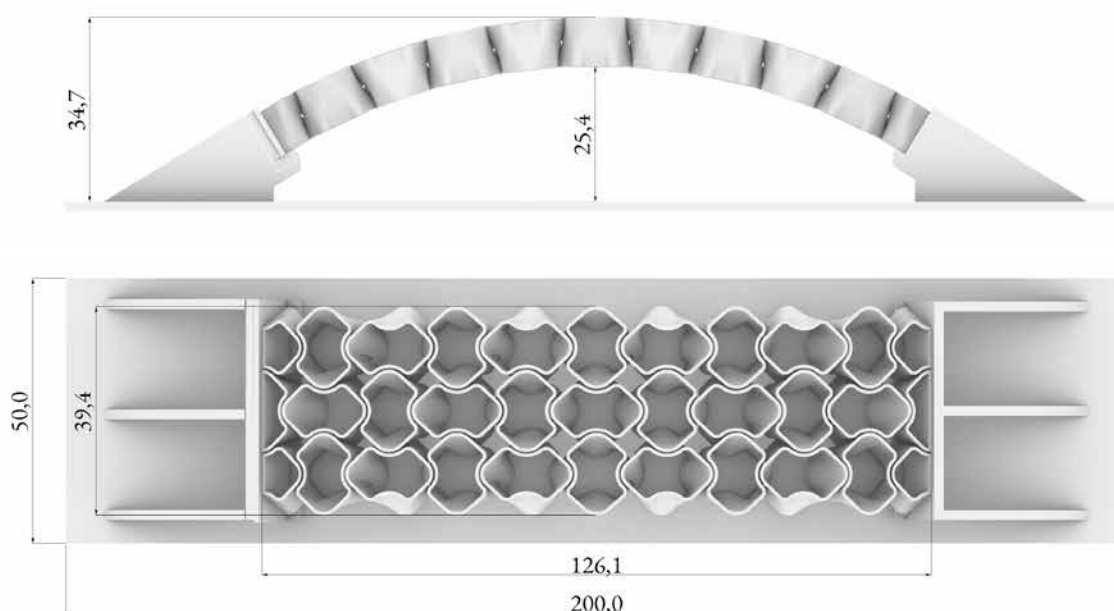
Figg. 134-138. Fotografie di alcuni concetti stampati. In particolare, nelle immagini in alto è possibile notare errori legati al ritiro di materiale (fondo non completamente pieno) o a variazioni impreviste della viscosità dell'impasto.

7.1.5. La realizzazione di un modello di volta a botte

Dopo aver individuato i corretti parametri di stampa si è proceduto alla realizzazione del modello di volta a botte. Come mostrato in figura 139, tale 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. La modellazione 3D è stata effettuata attraverso il software Rhinoceros con il plug-in Grasshopper. 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.

Poiché la trama prevede che l'elemento osteomorfo si ripeta nello spazio orientandosi in maniera alternata lungo la direzione U e la V, e poiché 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 (fig. 140). La possibilità di avere solo quattro tipologie di blocchi ha notevolmente semplificato le fasi di produzione per questa sperimentazione, nonostante una delle maggiori potenzialità della stampa 3D riguardi proprio l'estrema customizzazione degli elementi e la possibilità di realizzare molti blocchi diversi senza la necessità di sprecare materiale per realizzare una vasta gamma di stampi.

Fig. 139. Schemi quotati della *maquette*.



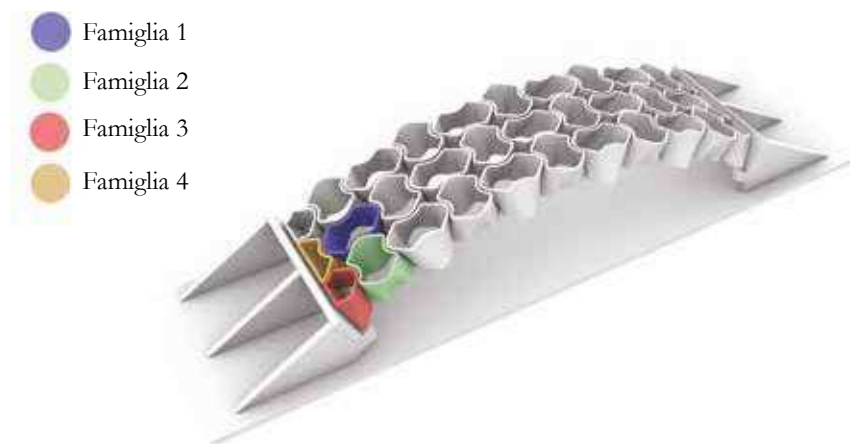


Fig. 140. Schema della volta con le quattro famiglie di conci evidenziate in colori diversi.

Dopo aver stampato tutti i blocchi, sono stati necessari tre giorni perché l'argilla si asciugasse del tutto e successivamente è stata necessaria una fase di limatura per rimuovere imperfezioni e materiale in eccesso (figg. 141-142). Successivamente, i conci sono stati cotti all'interno di un forno professionale per ceramica presso il FabLab Poliba (figg. 143-144). I pezzi cotti hanno assunto l'aspetto mostrato nelle figure 145-146.



Figg. 141-142. La fase di limatura dei pezzi asciutti.



Figg. 143-144. La preparazione dei pezzi nel forno professionale, presso il FabLab Poliba.

Figg. 145-146. I conci cotti.



Una volta ultimata la cottura di tutti i conci, si è passati all'assemblaggio del prototipo. Questa operazione si è rivelata piuttosto complessa, poiché la geometria osteomorfa dei blocchi impedisce la realizzazione degli archi in maniera classica, ossia disponendo gli elementi su una centina a partire dalle spalle fino alla chiave: in questo caso, infatti, il concio in chiave non può essere semplicemente calato dall'alto. Si è, perciò, predisposto un sistema di centine mobili: anziché avere la sagoma di un arco intero, le due metà dell'arco si sono mantenute separate e le si è lasciate libere di scorrere su rulli. Tramite fresatura si è realizzata anche la base rettangolare lignea, a cui sono state fissate le spalle, anch'esse composte da elementi fresati.

Lo schema di assemblaggio è sintetizzato nella figura 147: si è dapprima fissata una delle spalle alla base, mentre l'altra è stata lasciata libera. Si sono affiancate le due metà di centina, poggiate sui rulli, alle spalle e si sono iniziati a disporre i conci, partendo dal basso. Quelli in chiave sono stati disposti sulla metà di centina in corrispondenza della spalla fissata a terra, poi si è avvicinata l'altra metà, con i restanti conci, completando la volta. Una volta ottenuta la configurazione finale, si è fissata anche la seconda spalla alla base utilizzando delle viti autofilettanti.

Prima di rimuovere le centine si è preferito aggiungere del silicone in corrispondenza dei giunti con difetti di aderenza molto evidenti: le deformazioni dovute allo spessore variabile dello strato di argilla – legato alle oscillazioni di densità – e al ritiro del materiale sia in fase di asciugatura che di cottura hanno impedito di avere dei giunti precisi. Tale problema, alla scala reale, sarebbe ammortizzato utilizzando la malta.

Dopo aver aggiunto il silicone nei punti più critici, si sono rimossi prima i rulli e poi la centina.

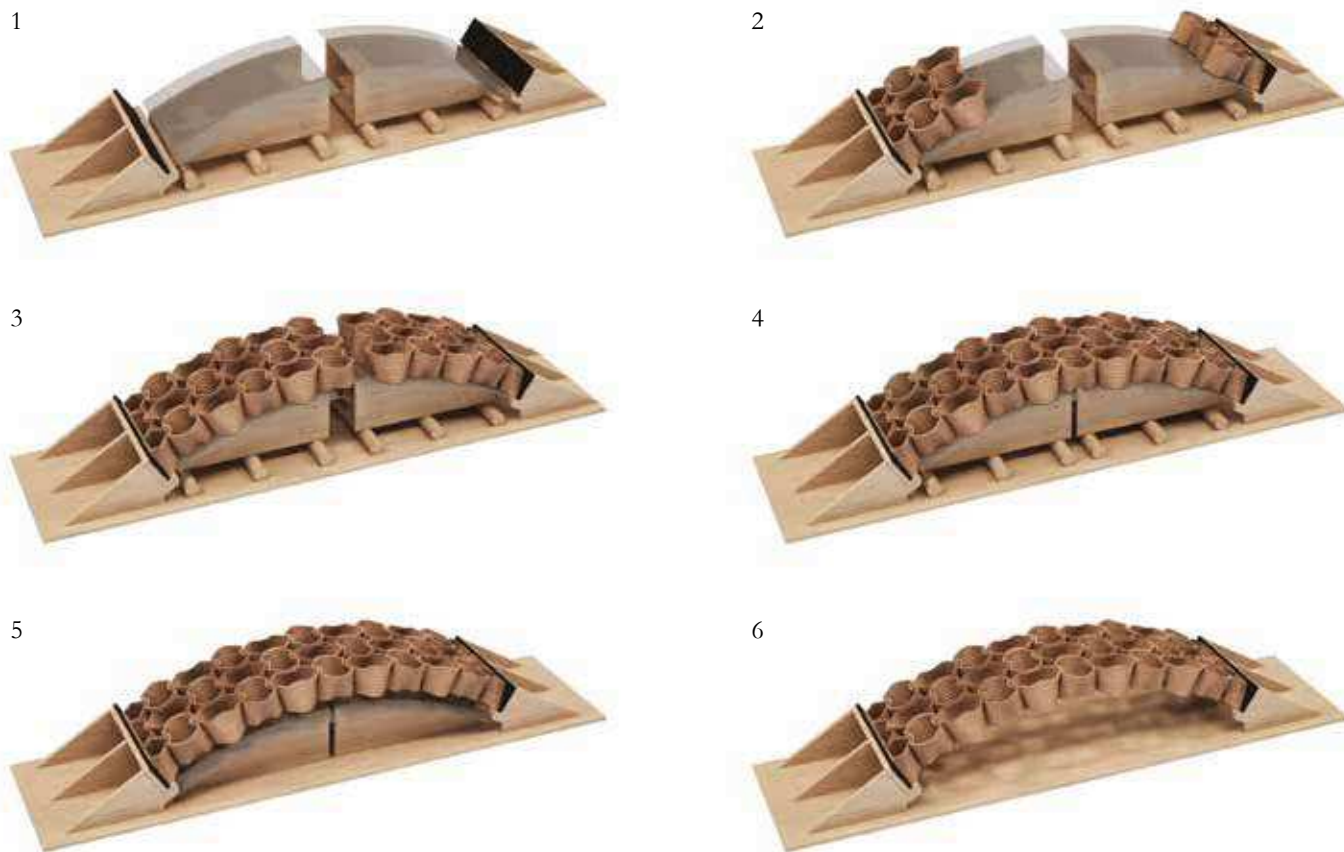


Fig. 147 (in alto). Le fasi di assemblaggio.

Fig. 148 (in basso). Il prototipo completo.



7.1.6. Test di rottura del prototipo

Per verificare l'efficienza del sistema costruttivo ideato si è effettuato un test di rottura sul prototipo. La prova si è svolta presso Tarricone Prefabbricati, a Corato (BA).

Dopo aver rinforzato l'attacco a terra delle spalle lignee con altre viti autofilettanti, si è proceduto a caricare la struttura in maniera graduale, impiegando sacchi di cemento da 25 kg ciascuno e facendo in modo che il carico fosse distribuito in maniera omogenea. Il prototipo ha ceduto con quindici sacchi, per una massa complessiva di 375 kg e un carico di 3,68 kN. Considerando il peso medio delle varie tipologie di conci, che ha permesso di stimare un peso totale della volta pari a circa 25,5 kg (0,25 kN), si può concludere che la piccola volta è stata in grado di sostenere un carico pari a quindici volte il proprio peso.



Figg. 149-150. Fotografie del test di rottura del prototipo.

7.1.7. Considerazioni finali

La costruzione di un prototipo in scala, insieme all'approfondimento attraverso ricerche bibliografiche, ha permesso di fare una serie di considerazioni in merito a questa applicazione della stampa 3D all'architettura, evidenziandone vantaggi e svantaggi.

Innanzitutto si può ribadire che la fabbricazione additiva risulta conveniente soprattutto per la realizzazione di oggetti di forma complessa, in particolare se si tratta di una produzione non standardizzata. In questo caso, per esempio, la necessità di avere quattro famiglie di conci dello stesso materiale avrebbe richiesto la realizzazione di quattro stampi diversi, il cui numero sarebbe drasticamente aumentato se la superficie della volta fosse stata più complessa. Nel caso di una produzione non di massa, ma limitata a un unico oggetto – per esempio una singola volta o un prototipo – la stampa 3D risulta molto vantaggiosa.

Tuttavia è importante sottolineare che utilizzare l'*additive manufacturing* non equivale a una totale libertà dal punto di vista formale e, se ciò risulta meno evidente nel caso della stampa 3D FDM – per cui l'uso di supporti o di altre tecniche avanzate, come la stampa di sostegni in materiali idrosolubili, offre un'ampia gamma di possibilità a livello geometrico –, nel caso della stampa 3D LDM le limitazioni si fanno più consistenti. Ciò impone una progettazione consapevole, che tenga conto del tipo di tecnica costruttiva da utilizzare, facendo attenzione soprattutto agli sbalzi e alla distribuzione della massa.

Uno dei vantaggi principali della tecnica LDM rispetto alla FDM è sicuramente la rapidità di produzione, che ha consentito di avere una lavorazione di soli sei minuti per la realizzazione di ogni blocco. Tuttavia la stampa di materiali viscosi è particolarmente soggetta a errori di fabbricazione, dovuti soprattutto a variazioni di densità del materiale, e ciò richiede un costante controllo della macchina in funzione, in modo da poter apportare manualmente eventuali modifiche a parametri come pressione o velocità di stampa.

Un ulteriore svantaggio dell'uso di materiali viscosi è legato a deformazioni più o meno consistenti dell'oggetto reale rispetto al *twin* virtuale. Esse possono dipendere da:

- l'attrito che esiste tra la base di stampa e la base del pezzo;

- la perdita di acqua in condizioni ambientali non controllate;
- le geometrie complesse e non concentriche;
- la naturale variazione di volume successiva alla fase di cottura.

Tali deformazioni provocano imprecisioni imprevedibili, che rendono impossibile l'ottenimento di giunti a incastro perfetti e impongono l'uso di malte – in questo caso si sono riempiti i vuoti eccessivi col silicone.

Altri ricercatori hanno già affrontato il tema della realizzazione di una struttura voltata tramite conci in argilla stampati in 3D. Un esempio significativo è costituito dal *3D Printed Ceramic Vaulted Shading System*, messo a punto da João Carvalho, Bruno Figueiredo e Paulo Cruz, dell'Università di Minho, in Portogallo^{113,114}. In questo caso si tratta del modello in scala di una volta composta da blocchi esagonali cavi caratterizzati da una trama interna. La difficoltà più importante riscontrata dagli studiosi riguarda proprio il ritiro significativo di materiale in fase di asciugatura, che ha provocato non solo lesioni, ma anche deformazioni importanti, con un notevole discostamento dalla geometria modellata in digitale. Ciò ha portato a una totale mancanza di aderenza tra i giunti e a una conseguente compromissione della struttura dal punto di vista statico: per permettere alla piccola volta di reggersi si è dovuta aggiungere un'intelaiatura all'intradosso (figg. 151-152).

Un'osservazione fatta dai ricercatori in merito al ritiro dei conci da loro progettati è che essa è avvenuta in maniera non omogenea ed è variata in base alla quantità e distribuzione di massa nelle varie direzioni – come si è precedentemente specificato, l'uso di geometrie non concentriche può causare deformazioni legate al ritiro più accentuate. In particolare, il ritiro è risultato più consistente quando la massa era inferiore, poiché era

¹¹³ Carvalho, J., Cruz, P. J. S., Figueiredo, B., *3D Printed Ceramic Vault Shading Systems*, in *Proceedings of the IASS Symposium 2018* (Boston, USA, 16-20 luglio 2018), International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2018.

¹¹⁴ Carvalho, J., Figueiredo, B., Cruz, P. J. S., *Free-form Ceramic Vault System. Taking ceramic additive manufacturing to real scale*, in Sousa, J. P., Xavier, J.P., Castro Henriques, G. (a cura di), *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference University of Porto* (Porto, Portugal, 11-13 settembre 2019), vol. 1, 2019, pp. 485-492.



presente un volume minore di materiale a “resistere” alla contrazione. Seguendo l’approccio adottato da Carvalho, Figueiredo e Cruz, si è provato a quantificare la discrepanza tra le geometrie finali ottenute e il modello digitale. Si è provato a studiare tre campioni per le due famiglie principali di conci – quelli interi, tralasciando i conci speciali in corrispondenza delle spalle –, che sono state contrassegnate dalle cifre 1 e 2, come mostrato nella figura 153. Si sono considerate le dimensioni massime e minime sia all’intradosso che all’estradosso della volta e l’altezza del blocco e si sono confrontati tali valori con quelli del modello digitale.

I dati raccolti sono stati organizzati nella tabella 8. I tre conci afferenti a una famiglia sono stati contraddistinti con le lettere a, b, c, precedute dal numero della famiglia stessa, mentre il corrispettivo virtuale è stato contrassegnato con la lettera v.

Osservando la tabella è possibile notare come in questo caso il ritiro si sia

Figg. 151-152. Fotografie Ceramic Shading System messo a punto da Carvalho, Figueiredo e Cruz. È evidente la mancata aderenza tra i giunti, che ha reso necessaria la struttura trasparente all'intradosso (© João Carvalho, Bruno Figueiredo, Paulo Cruz).

Fig. 153. Schemi delle famiglie prese in considerazione per le misurazioni e delle quote considerate.



Tabella 8. Misure dei conci virtuali e reali a confronto

Concio	x [cm]	y [cm]	X [cm]	Y [cm]	h [cm]
1v	7,7	15,6	17,5	7,6	9,1
1a	8,3	15,2	17,8	8,1	8,7
1b	9,0	15,6	17,3	7,3	8,8
1c	9,0	15,7	17,6	8,1	8,7
2v	15,9	7,4	8,3	15,5	9,3
2a	15,7	8,5	8,1	15,5	9,2
2b	15,4	8,1	8,1	15,5	9,2
2c	15,4	8,2	8,3	15,5	9,1

rivelato poco consistente, anzi, in alcuni casi le dimensioni dell'oggetto reale risultano addirittura maggiori rispetto a quelle del modello digitale. Ciò si può ricondurre innanzitutto alla geometria, che presenta una massa distribuita in maniera omogenea, e anche all'adozione della sovraestrusione. In particolare, si può notare che i modelli reali presentano dimensioni maggiori rispetto al modello virtuale soprattutto laddove il concio è più stretto, presumibilmente perché il ritiro è avvenuto in proporzione in maniera minore rispetto ai lati lunghi e la sovraestrusione è stata ammortizzata di meno.

Per concludere, una considerazione importante va fatta in merito al sistema costruttivo in sé. Numerose sono le possibilità progettuali offerte dalla semplicità con cui si possono combinare le geometrie a doppia curvatura con quelle cave. Tuttavia sussiste il problema della complessità di assemblaggio.

Il montaggio di un prototipo di dimensioni ridotte ha richiesto l'uso di centine mobili ma, in scala reale, questo sistema risulterebbe ostico e dispendioso, in quanto sarebbe necessario usare centine su binari, a meno di progettare un concio in chiave differente.

Ciò testimonia l'esigenza di sviluppare una consapevolezza architettonica e uno spirito critico tali da sfruttare al meglio le potenzialità delle nuove

Figg. 154-155 (alla pagina seguente). Fotografie della Stereotomic Green Vault, esposto in occasione di Externa 2022 alla Fiera del Levanta (Bari).

Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVI ciclo, Novembre 2020 - Gennaio 2024
Curriculum: Costruzione

tecnologie di fabbricazione digitale e da evitare di concentrarsi troppo sulla sola ottimizzazione del processo costruttivo del singolo componente a discapito della struttura globale.



7.2. Stereotomic Tripod

7.2.1. Introduzione

Lo Stereotomic Tripod è un prototipo di volta triangolare costituita da conci stampati in 3D con tecnologia FDM: differentemente dalla Stereotomic Green Vault, realizzata estrudendo una miscela fluida a freddo, è stato impiegato il PLA¹¹⁵, che viene depositato a seguito della sua fusione a circa 200 °C.

Similmente al precedente prototipo, anche lo Stereotomic Tripod viene concepito con lo scopo di proporre una reinterpretazione innovativa degli spazi voltati cassettonati attraverso la fabbricazione di elementi cavi che, in questo caso, possono essere utilizzati così come sono – ottenendo strutture diafane – oppure possono essere combinati con il materiale lapideo.

La volta è composta da porzioni differenti, tassellate con tre diverse geometrie di conci, che, essendo elementi cavi, possono essere fissati tra loro attraverso un sistema di viti e bulloni, il quale ne consentirebbe il montaggio senza l'uso di centine, garantendo un notevole risparmio di materiale, oltre che una considerevole semplificazione dell'intero processo di costruzione.

Questa strategia di assemblaggio è stata messa a punto ispirandosi a una

¹¹⁵ Il PLA (acido polilattico) è una plastica ottenuta a partire da materiali naturali come il mais. Nonostante venga spesso definito biodegradabile, in realtà il PLA è compostabile attraverso l'uso di impianti industriali.

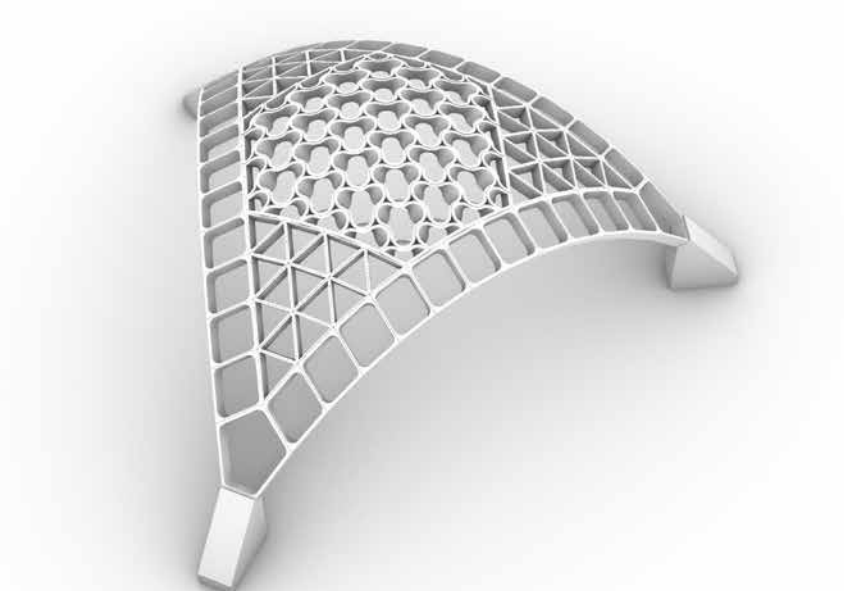


Fig. 156. Modello 3D
dello Stereotomic Tripod.

struttura già realizzata in modo simile: si tratta di Flux, un padiglione progettato dal prof. Fallacara e da Maurizio Barberio nel 2017 ed esposto in occasione di importanti eventi internazionali, come la fiera Rocalia 2017, a Lione (fig. 157), o la 17. Mostra Internazionale di Architettura della Biennale di Venezia, nel 2021. Flux è un padiglione smontabile in pietra. La possibilità di assemblare e disassemblare la struttura è garantita dalla modalità di connessione dei blocchi: non sono utilizzate malte e collanti, ma, in corrispondenza dei giunti, alle facce dei conci sono fissate delle piastre metalliche, che possono essere reciprocamente avvitate (fig. 158). Grazie a queste piastre i conci possono essere posizionati in modo perfetto durante l'assemblaggio e ciò rende superfluo l'uso di centine realizzate ad hoc. In questo caso, per via del peso della pietra, è stato comunque necessario l'ausilio di una struttura di sostegno, ma sono state sufficienti semplici impalcature industriali. Una centina lignea a waffle simile a quelle impiegate per i padiglioni precedentemente analizzati avrebbe comportato costi molto superiori e un notevole spreco di materiale. Il fissaggio reciproco dei conci, inoltre, migliora anche il prototipo stesso dal punto di vista della sicurezza.

Nel caso dello Stereotomic Tripod, come si vedrà più avanti, non è stato necessario alcun tipo di sostegno per via della leggerezza dei componenti.

Figg. 157-158. Flux esposta in occasione di Rocalia 2017. Nell'immagine a destra è possibile osservare il dettaglio del giunto.



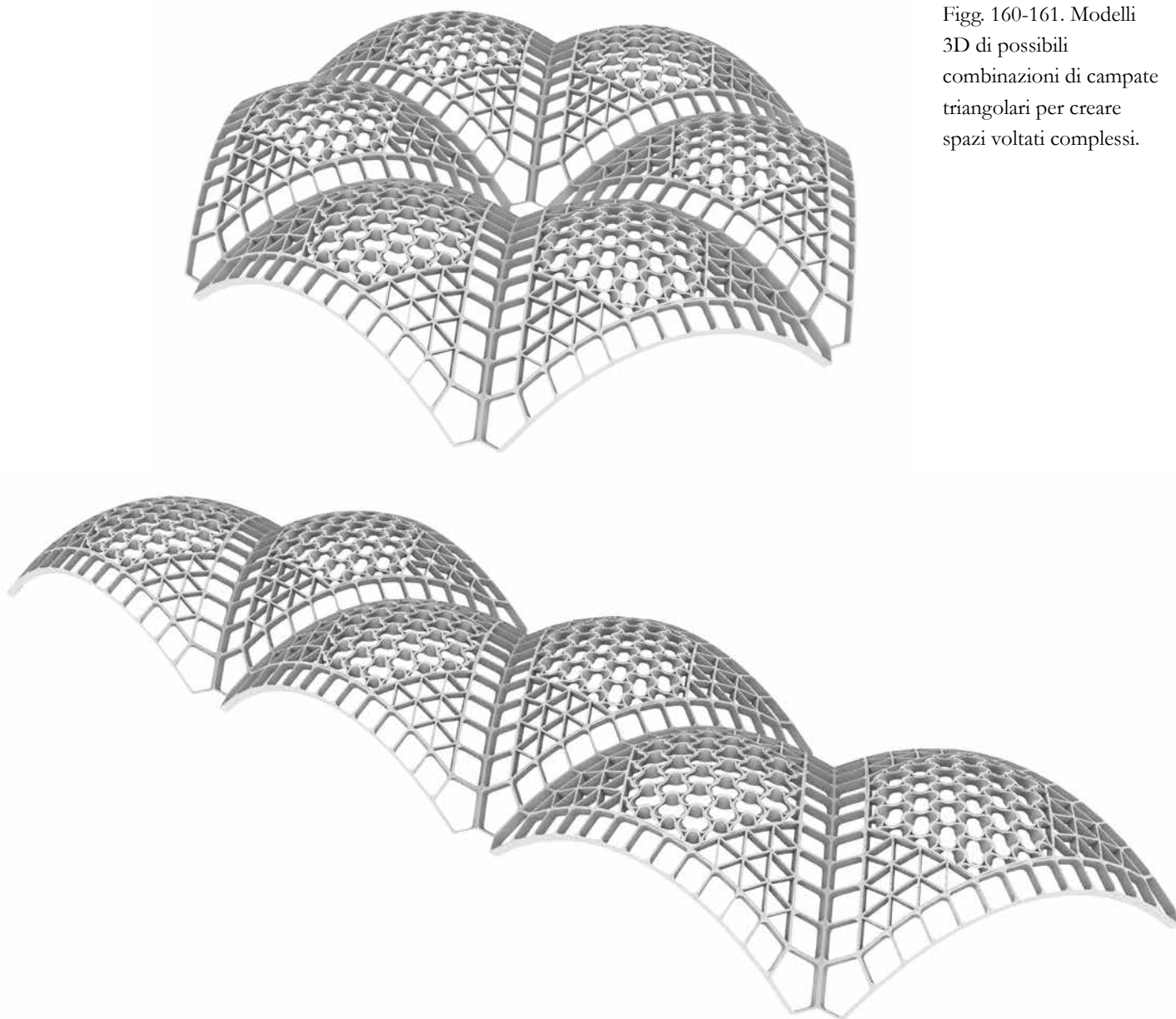
7.2.2. Il progetto

L'impianto triangolare dello Stereotomic Tripod è stato concepito come omaggio a Guarino Guarini, uno dei pochi italiani a essersi dedicato – almeno nei suoi trattati teorici – alla disciplina stereotomica. La Cappella della Sindone di Guarini – una delle sue più celebri architetture – è, infatti, planimetricamente strutturata in modo da riprendere la geometria del triangolo.

Oltre alla volontà di celebrare, almeno in parte, la poetica guariniana, si sono fatte alcune considerazioni sulla conformazione triangolare, in grado, come il quadrato e l'esagono, di saturare lo spazio: se replicato, il modulo della volta può dare vita ad ambienti più complessi caratterizzati da campate triangolari, poco diffuse in architettura (figg. 160-161).

Fig. 159. La volta della Cappella della Sindone di Guarino Guarini (Torino, 1668-1694).





Figg. 160-161. Modelli 3D di possibili combinazioni di campate triangolari per creare spazi voltati complessi.

Per la progettazione si è partiti dall'assetto planimetrico: si è disegnato un triangolo di base avente lato pari a 6 m e inscritto in una circonferenza di 6,9 m di diametro.

Per prima cosa si è stabilito lo spessore degli archi di bordo attraverso un *offset* del triangolo di circa 50 cm, poi si è effettuata la loro divisione in conci: undici per ogni arco più i tre blocchi angolari.

Successivamente si sono ritagliati i pennacchi angolari, caratterizzati da un pattern triangolare. Le dimensioni di questi altri blocchi sono state calibrate in maniera che esistesse una corrispondenza tra i giunti dei

triangoli e i giunti degli archi di bordo e che, in questo modo, ci fosse continuità tra le parti.

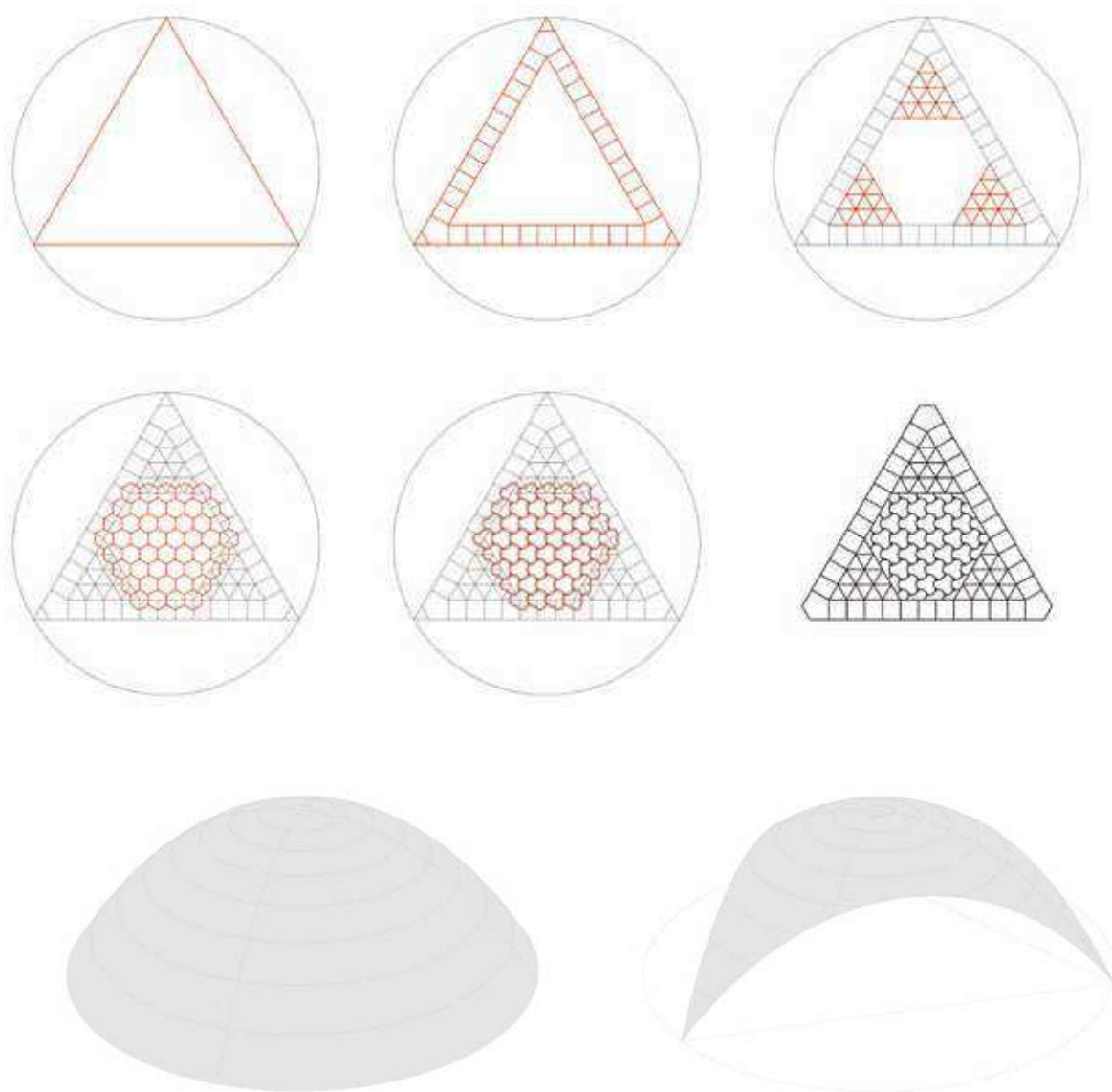
La porzione risultante, un esagono non regolare centrale, è stata, invece, tassellata con una trama di conci curvilinei a base esagonale. Tali conci, sono poi stati sviluppati in 3D per avere giunti con incastro a doppia curvatura.

Dopo aver effettuato le suddivisioni e aver disegnato i vari pattern in pianta, si è proceduto a creare l'intera struttura in 3D.

Per la modellazione della volta si è partiti da una superficie generata tramite la rivoluzione di una curva catenaria intorno a un asse centrale, creando una calotta di diametro di 6,9 m.

Fig. 162. Fasi della progettazione planimetrica del tripode.

Fig. 163 (in basso). la porzione di calotta usata come riferimento per l'intradosso del tripode.



Una catenaria è una curva che corrisponde alla configurazione assunta da una catena fissata alle estremità e lasciata appesa sotto l'influenza del proprio peso. In questo caso la catena risulta soggetta a soli sforzi di trazione; se si fissassero tutti gli anelli della catena e si ribaltasse la geometria, si avrebbe un arco soggetto esclusivamente a sforzi di compressione: si tratta del principio della catenaria inversa, ipotizzato per la prima volta da Robert Hooke nel 1675. Poiché le opere in muratura lavorano meglio a compressione e sono del tutto inefficienti rispetto agli sforzi di trazione, la catenaria risulta la forma più performante per archi e volte e, per questo motivo, si è scelto di usare questa curva come generatrice della calotta di partenza¹¹⁶.

Il guscio ottenuto è servito da riferimento per poter modellare in 3D tutti i conci della struttura. Esso ha rappresentato l'intradosso della volta, che si è ipotizzato dovesse avere uno spessore di 15 cm.

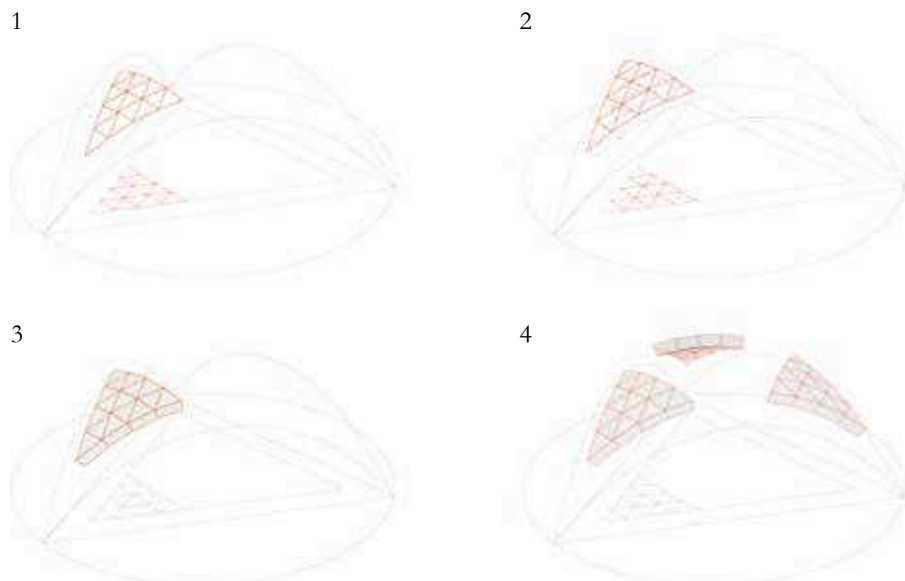
Tale procedimento ha richiesto sia fasi di modellazione NURBS tradizionale, tramite Rhinoceros, sia di modellazione parametrica, tramite il plug-in Grasshopper.

I conci più facili da modellare sono stati quelli triangolari, per i quali si è adottato il seguente procedimento:

- 1) si sono proiettati i triangoli di uno dei tre pennacchi angolari sulla calotta. Poiché le curve proiettate seguono l'andamento della superficie, si sono ridisegnati i triangoli affinché fossero planari, collegando i vertici di ciascuno con una polilinea chiusa;
- 2) si è effettuato un offset di 15 cm della calotta intradosale, in modo da ottenere la superficie di estradosso, vi si sono proiettati i triangoli e si sono resi planari con lo stesso procedimento di prima;
- 3) le due serie di curve – intradosali ed estradosali – hanno consentito di ottenere dei *loft* solidi, corrispondenti ai singoli conci triangolari;
- 4) si è effettuata una serie polare di tre elementi per avere tutti e tre i pennacchi triangolari.

¹¹⁶ Block, P., DeJong, M., Ochsendorf, J., *As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches*, in *Nexus Network Journal*, vol. 8, 2006, pp. 13-24.

Fig. 164. Fasi della modellazione dei conci triangolari.



La planarizzazione delle curve è stata un passo fondamentale per poter disporre i conci sul piatto di stampa e garantire una fabbricazione agevole; inoltre, pur dovendo realizzare geometrie cave, si è scelto di modellare solidi pieni: per realizzare un oggetto cavo, infatti, è sufficiente scegliere un *infill* pari allo 0% ed eliminare del tutto il *top* e il *bottom*, stabilendo soltanto lo spessore del perimetro in base al numero di strati di materiale. Anche i conci curvilinei sono stati modellati come solidi pieni, ma in questo caso il procedimento è stato più complesso poiché si sono dovuti ottenere dei blocchi osteomorfi che potessero incastrarsi reciprocamente. Il criterio adottato è simile a quello dei conci della Stereotomic Green Vault, ossia un *loft* tra due curve di bordo – una sull’estradosso e una sull’intradosso – reciprocamente ruotate rispetto all’asse centrale del solido. In questo caso la modellazione dei solidi è avvenuta direttamente su Grasshopper, con il seguente procedimento:

- 1) si è disegnato il pattern in pianta. Poiché la tripode è caratterizzato da una simmetria radiale, è stato sufficiente rappresentare solo un terzo delle geometrie che poi sono state proiettate sulla superficie di intradosso. In questo caso, non trattandosi di poligoni, si è dovuta effettuare la planarizzazione tramite uno specifico componente di Grasshopper;
- 2) tramite un codice Grasshopper, le stesse curve disegnate in pianta sono state ruotate di 180°, ciascuna rispetto al proprio centro, si

sono proiettate sulla superficie di estradosso e sono state anch'esse planarizzate;

- 3) si è effettuato un *loft* tra le curve di intradosso e quelle di estradosso, per avere i conci osteomorfi solidi;
- 4) si sono replicate le geometrie per tre volte attorno al centro del tripode tramite una serie polare,
- 5) per sagomare correttamente i conci di bordo si è proiettato sulle calotte anche l'esagono che delimitava la porzione esagonale occupata dai conci osteomorfi, si è eseguito un *loft* tra le due curve e si è sfruttata la superficie ottenuta per tagliare i blocchi tramite una operazione booleana.

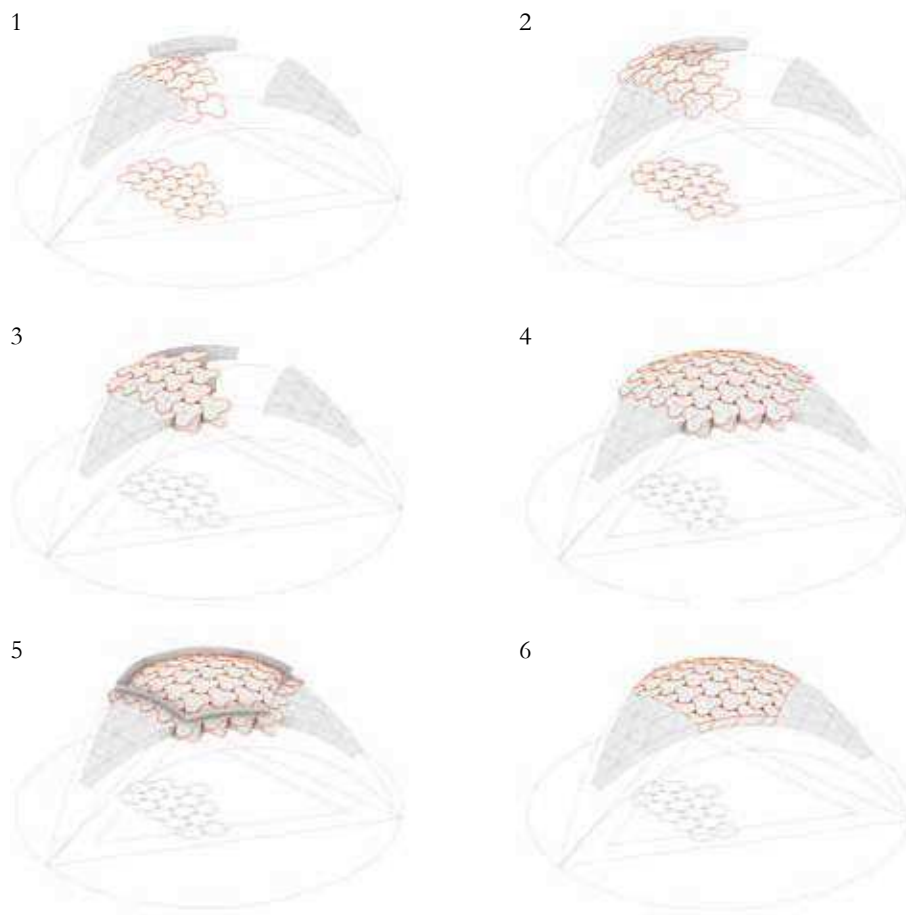


Fig. 165. Fasi della modellazione dei conci osteomorfi.

Per quanto riguarda gli archi, invece, si è fatto ricorso alla modellazione classica al posto di quella parametrica. Dopo aver effettuato tutte le operazioni di proiezione e planarizzazione già descritte precedentemente per ottenere dei blocchi solidi stampabili, si è fatta una considerazione in merito al loro comportamento statico. Poiché i quadrilateri – diversamente dai triangoli – sono geometrie deformabili, si è deciso di rinforzare gli angoli dei conci attraverso un arrotondamento del bordo interno delle pareti perimetrali. Tale accorgimento non poteva essere adottato direttamente nel software di *slicing*, perciò, in questo caso, si è dovuto disegnare a mano il concio cavo, piuttosto che pieno. Dopo alcune prove di stampa, si è stabilito di assegnare uno spessore di 1 cm alle pareti in corrispondenza dei giunti tra i conci dell'arco e uno spessore di 2 cm alle pareti laterali del concio.

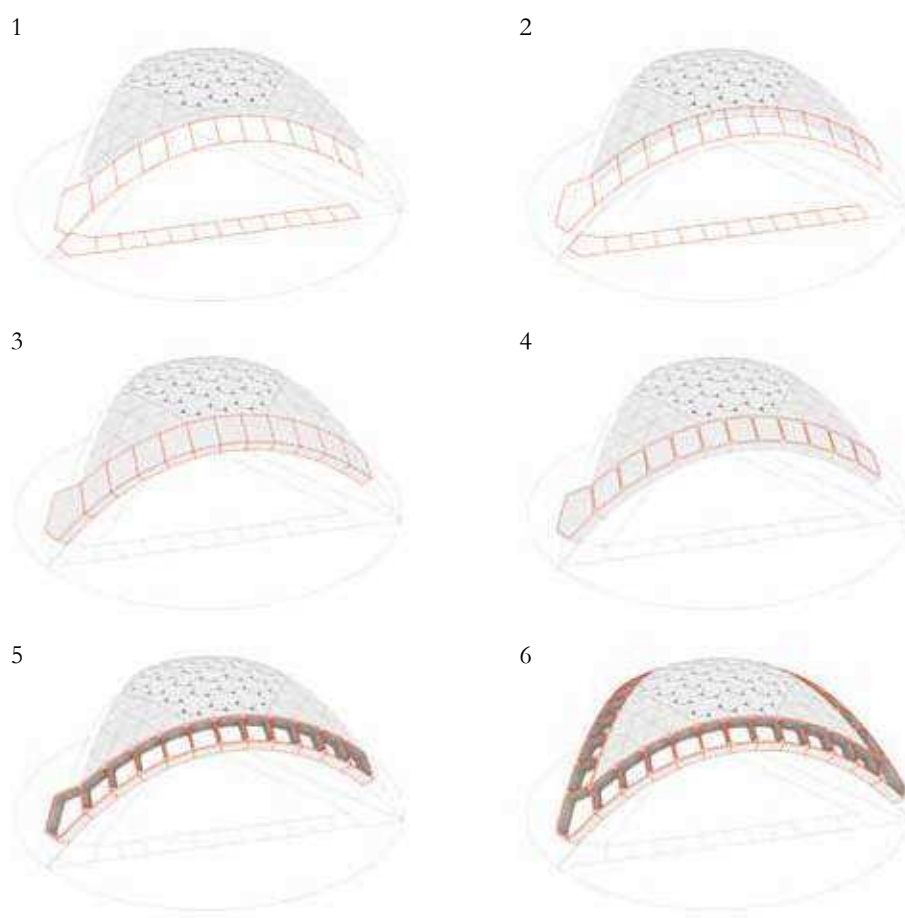


Fig. 166. Fasi della modellazione dei conci degli archi di bordo.

A questo punto si sono effettuate delle prime valutazioni circa il consumo di materiale in caso di realizzazione di un singolo arco del prototipo in scala reale. Per le dimensioni precedentemente indicate si è ottenuta una stima del peso di circa 100 kg, ritenuti eccessivi soprattutto dal punto di vista del consumo di materiale, perciò si è ridimensionata l'intera volta, scalandola del 30% in modo che fosse inscritta in una circonferenza di 4,8 m di diametro, che il triangolo avesse ciascun lato pari a 4,2 m e che il guscio fosse spesso 10,5 cm. In questo modo il peso del singolo arco si è ridotto a circa 40 kg.

Dopo questa operazione si sono ricalibrati gli spessori dei conci quadrangolari in modo che fossero sempre pari a 1 cm sui giunti e 2 cm sui lati.

Per finire si sono modellate le spalle dell'arco.

7.2.3. La prototipazione del modello in scala 1:5

Prima di realizzare un modello in scala reale si è ritenuto opportuno fabbricarne uno in scala 1:5, per simulare in piccolo l'assemblaggio senza centinaia e valutarne eventuali problemi.

Si è scelto di stampare la *maquette* in PLA con un gradiente di quattro colori, dal bianco all'azzurro, per richiamare la sfumatura della volta celeste. Si sono utilizzate le stampanti Ultimaker 3 e S5, disponibili presso il FabLab Poliba.

Prima di procedere con la stampa, si è rifinito il modello 3D affinché i giunti presentassero una tolleranza di 0.4 mm; successivamente si sono disposti quanti più conci possibile su ciascun piatto di stampa, in modo da ottimizzare i tempi di produzione. Si è utilizzato un ugello da 0.4 mm e, per i conci triangolari e quelli osteomorfi, si è scelto di mantenere tre strati perimetrali, per uno spessore di 1,2 mm.

Tutti i blocchetti sono stati numerati, in modo da agevolarne l'assemblaggio, per il quale è stato utilizzato del nastro biadesivo che simulasse il fissaggio reciproco con viti e bulloni. Una volta completata la calotta, si sono fissate le spalle su una base in legno tramite delle viti, in modo da contrastare le spinte della struttura.

Tutto il processo di montaggio è stato svolto durante il workshop di alta formazione intitolato *Nuovi Strumenti e Metodi per l'Architettura e il Design*, svoltosi presso il FabLab Poliba dal 13 al 17 marzo 2023.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi

Fig. 167. La stampa di alcuni dei conci in scala.



Fig. 168. I conci del plastico numerati.



Il montaggio è perfettamente riuscito anche senza l'ausilio di centine, seppur sia stato complesso posizionare correttamente tutti i conci, che, oltre ad avere una precisa disposizione all'interno delle trame della volta, prevedono uno specifico orientamento non sempre immediatamente individuabile. Inoltre, similmente alla Stereotomic Green Vault, si sono riscontrate delle difficoltà nel sistemare il concio in chiave, di natura osteomorfa. Nell'assemblaggio in scala si è optato per la suddivisione della volta in tre terzi simmetrici, che sono stati posizionati correttamente in un secondo momento, tuttavia alla scala reale un simile procedimento potrebbe risultare problematico.



Figg. 169-172. Fotografie scattate durante il workshop *Nuovi Strumenti e Metodi per l'Architettura e il Design*, svoltosi presso il FabLab Poliba dal 13 al 17 marzo 2023.



7.2.4. La prototipazione del modello in scala reale

Per quanto riguarda la fabbricazione del prototipo in scala reale, si è utilizzata la stampante Delta WASP 3 mt presso il FabLab Poliba e si è stampato con pellet di PLA. L'occasione per la sua effettiva realizzazione si è concretizzata con l'invito alla mostra *Marmomac Meets Academies 2023*, afferente alla fiera Marmomac di Verona e curata dal prof. Fallacara.

Inizialmente si è pensato di costruire solo un arco, tuttavia l'azienda WASP, con cui si è instaurata una collaborazione proprio in vista della mostra, si è resa disponibile a fornire il pellet necessario alla realizzazione di tutti e tre gli archi di bordo e delle vele triangolari. Si è scelto di non fabbricare i conci osteomorfi sia per questioni legate al tempo di fabbricazione, sia perché, avendo pochi giorni a disposizione per l'assemblaggio del prototipo presso la fiera prima dell'inaugurazione dell'esposizione, si è ritenuto che il procedimento di assemblaggio sarebbe stato eccessivamente complicato.

Per coprire la porzione esagonale rimasta vuota, dunque, si è progettata e realizzata insieme ai colleghi dottorandi Alessandro Angione e Dario Costantino una calotta in fibre di carbonio e di vetro combinate con resina epossidica. Tale guscio è stato suddiviso in tre elementi pentagonali identici per questioni di realizzabilità e trasportabilità.

Figg. 173-174. La tessitura di una delle porzioni pentagonali in fibra (a sinistra) e pezzo finito (a destra).



Per quanto concerne i conci degli archi, prima di procedere alla stampa dei pezzi si è ricalibrato il modello 3D, impostando, in questo caso, una tolleranza di 2 mm e ricavando i fori per le viti.

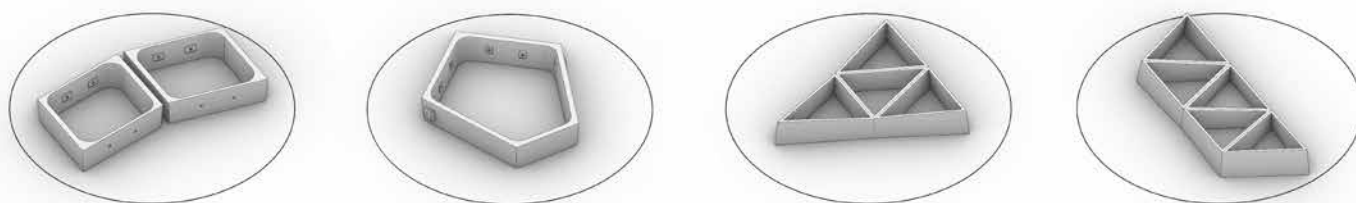
Invece, per quanto concerne le vele triangolari si è ritenuto opportuno stampare il minor numero di pezzi possibile, sempre per ragioni di semplicità di assemblaggio. Il pattern, dunque, è stato suddiviso in due porzioni, una triangolare e una trapezoidale, compatibili con il piatto della Delta WASP 3 mt. Tali blocchi sono stati appiattiti sul lato estradossale – per agevolare la stampa – e sono stati predisposti per essere agganciati agli archi di bordo ricavando altri fori per le viti.

Per la stampa di tutti i conci è stato necessario all'incirca un mese: diversamente dalla tecnologia LDM, infatti, la FDM richiede tempi di fabbricazione più lunghi. I conci quadrangolari sono stati stampati a coppie per questioni di ottimizzazione e ciascuna coppia ha richiesto un tempo variabile compreso tra le quattordici e le diciassette ore. I blocchi pentagonali in corrispondenza delle spalle – troppo grandi per essere stampati a coppie – sono stati fabbricati singolarmente e ciascuno ha richiesto circa quindici ore. Infine i pezzi delle vele hanno necessitato di circa sedici ore.



Figg. 175-176. Due conci quadrangolari e un concio pentagonale sul piatto di stampa.

Fig. 177 (in basso). Schema delle varie tipologie di blocco disposte sul piatto di stampa della Delta WASP 3 mt.



Nel corso della fase di fabbricazione si sono adottati degli accorgimenti per correggere alcuni dei difetti di stampa. Un primo problema che si è presentato è stato lo *stringing*: come si è spiegato nel sesto capitolo, quando l'ugello si arresta dopo aver completato un layer e si sposta per iniziarne un altro, continua a fuoriuscire materiale, che produce filamenti indesiderati. In questo caso, per rendere il difetto meno accentuato, si è intervenuti non solo sulla velocità di stampa, ma anche sulla temperatura, abbassandola per fare in modo che la plastica fosse un po' più densa.

Il secondo problema che si è presentato è stato il *warping*: alcune parti degli oggetti stampati tendevano a distaccarsi dal piatto di stampa, provocando delle deformazioni significative. Il piatto della Delta 3 mt, infatti, tende a non riscaldarsi in maniera omogenea e le parti periferiche risultano più fredde della parte centrale. Se i pezzi presentano un'estensione significativa, come in questo caso, le porzioni che si trovano in corrispondenza delle estremità del piatto tendono a staccarsi. Per questo motivo si è aumentata la temperatura del piano, portandola da 70 °C a 80 °C, e si è stampato utilizzando un *brim*¹¹⁷ di dieci perimetri per migliorare l'aderenza dei pezzi al piatto.

Alla prototipazione è succeduta una fase di post-produzione per rimuovere tutte le imperfezioni della stampa: si è rimosso il *brim*, si sono limati tutti i filamenti provocati dallo *stringing* e si sono allargati i buchi per le viti, rimuovendo i difetti di stampa al loro interno con un trapano.

Per dimostrare come questo tipo di concio possa avere applicazioni

¹¹⁷ Il *brim* consiste nella stampa di un sottile strato di materiale intorno al perimetro del primo layer e attaccato ad esso. Serve ad aumentare la superficie che aderisce al piatto di stampa, ostacolando il distacco dallo stesso. Una volta che il pezzo è completo, il *brim* è facilmente rimovibile in postproduzione.

Figg. 178-179. Uno dei concii stampati prima e dopo l'uso del *brim* come strategia di stampa. Nella foto a sinistra è molto evidente il distaccamento dei bordi dal piatto di stampa (*warping*).



differenti, i conci pentagonali sono stati trattati diversamente dagli altri: la parte all'estradosso, infatti, è stata chiusa con una lastra di pietra di Apricena spessa 2 cm. Si è scelto di utilizzare la pietra solo sui conci pentagonali per questioni di praticità, poiché il peso del blocco è aumentato considerevolmente: assemblare l'intero prototipo con elementi così pesanti sarebbe stato molto più complesso. Tuttavia è resa l'idea di come, se tutti i blocchi fossero chiusi all'estradosso, si potrebbe avere una volta cassettonata "2.0", costituita da elementi portanti anziché solo decorativi e, in questa maniera, è possibile dimostrare come l'uso della stampa 3D risulti interessante anche in caso di commistione con un materiale tradizionale come la pietra.

Per quanto riguarda le spalle, anch'esse sono state realizzate in pietra di Apricena¹¹⁸.

¹¹⁸ Sia le lastre di copertura dei conci pentagonali sia le spalle sono state realizzate con la pietra fornita da Stilmarmo srl (Apricena, FO) e sono state lavorate da Francesco Brunetti (CNC Design, Mola di Bari, BA).

Figg. 180-181. La postproduzione dei blocchi stampati.

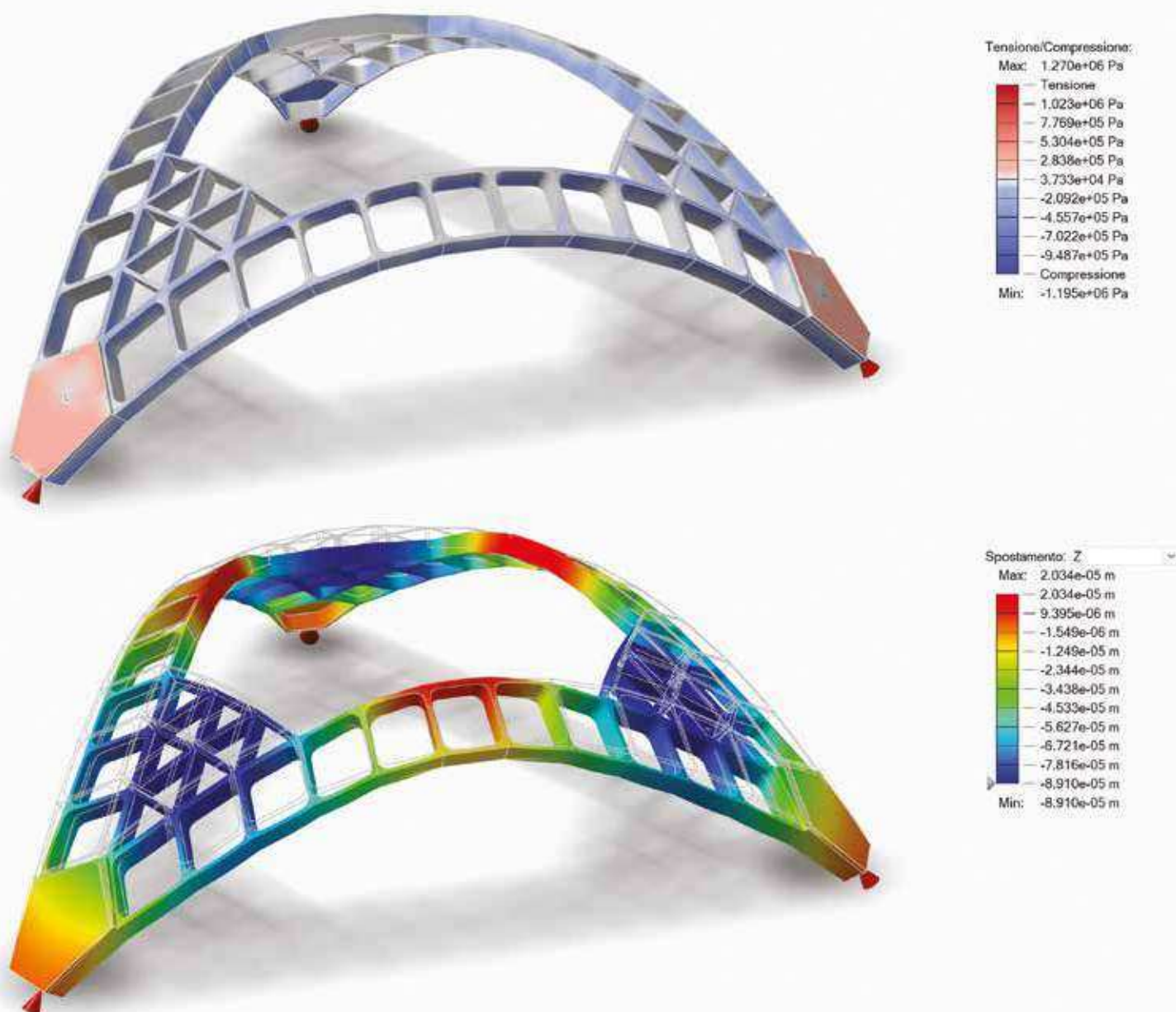


Fig. 182. Grafici che mostrano i risultati dell'analisi condotta. In alto sono mostrate le aree compresse e le aree tese. In basso è mostrata una rappresentazione esagerata della deformazione del tripode e sono evidenziati attraverso i colori i valori numerici degli spostamenti verticali.

Prima del montaggio si sono effettuate delle analisi strutturali per valutare il comportamento statico del tripode sotto il carico del solo peso proprio, attraverso il software Altair Inspire.

È emerso che, data la geometria catenaria, la struttura risulta soggetta prevalentemente a sforzi di compressione, con sforzi di trazione irrilevanti in corrispondenza dell'intradosso. Gli sforzi sono comunque nettamente inferiori ai valori di resistenza tenuti in considerazione, desunti dai siti web di Stilmarco per la pietra (resistenza a compressione pari a 187 MPa e a trazione pari a 18,6 MPa) e di WASP per il PLA (resistenza a compressione e a trazione pari a 60 MPa).

Anche gli spostamenti lungo l'asse z risultano trascurabili.



7.2.5. L'assemblaggio

Come anticipato, l'assemblaggio del prototipo è avvenuto senza l'uso di centine. Tutte le fasi di montaggio si possono sintetizzare come segue:

- 1) si sono posizionate le spalle seguendo le dimensioni del modello digitale e a ciascuna spalla è stato collegato un cavo d'acciaio. I tre cavi sono stati uniti al centro dell'area coperta dal tripode e messi in tensione tramite un tensore. Questo espediente è stato adottato per annullare le spinte della struttura;
- 2) i conci pentagonali sono stati fissati alle spalle, alle quali era stato preventivamente praticato un alloggiamento per una vite. I conci pentagonali sono stati mantenuti in posizione con l'aiuto di un puntone;
- 3) si sono montati a terra gli archi, avvitando i conci e posizionandoli intorno alle spalle;
- 4) si sono posizionati correttamente gli archi e li si è fissati ai conci pentagonali. Considerato il peso di ciascun arco (circa 40 kg), tre persone sono state sufficienti a tenerlo in posizione, mentre altre due avvitavano i bulloni alle estremità. Ciascun arco, poi, è stato messo in sicurezza con un puntone;
- 5) gli elementi col pattern triangolare sono stati correttamente posizionati e fissati agli angoli del tripode;
- 6) per finire, i tre elementi della calotta in fibra sono stati fissati tra loro con delle fascette e poi sono stati correttamente posizionati e fissati con altre fascette alla volta.

Una prima prova di assemblaggio si è svolta presso Tarricone Prefabbricati (Corato, BA). L'intera procedura di montaggio e successivo smontaggio ha richiesto solamente una mattinata, dimostrando la praticità del sistema costruttivo messo a punto e dei materiali utilizzati, i quali hanno garantito una leggerezza dei componenti tale da non richiedere l'uso di muletti, gru o altri macchinari. Dopo questo primo test, il prototipo è stato montato presso il padiglione 10 di Veronafiere, per poter essere esposto in occasione di *Marmomac Meets Academies 2023*, dal 26 al 29 settembre.

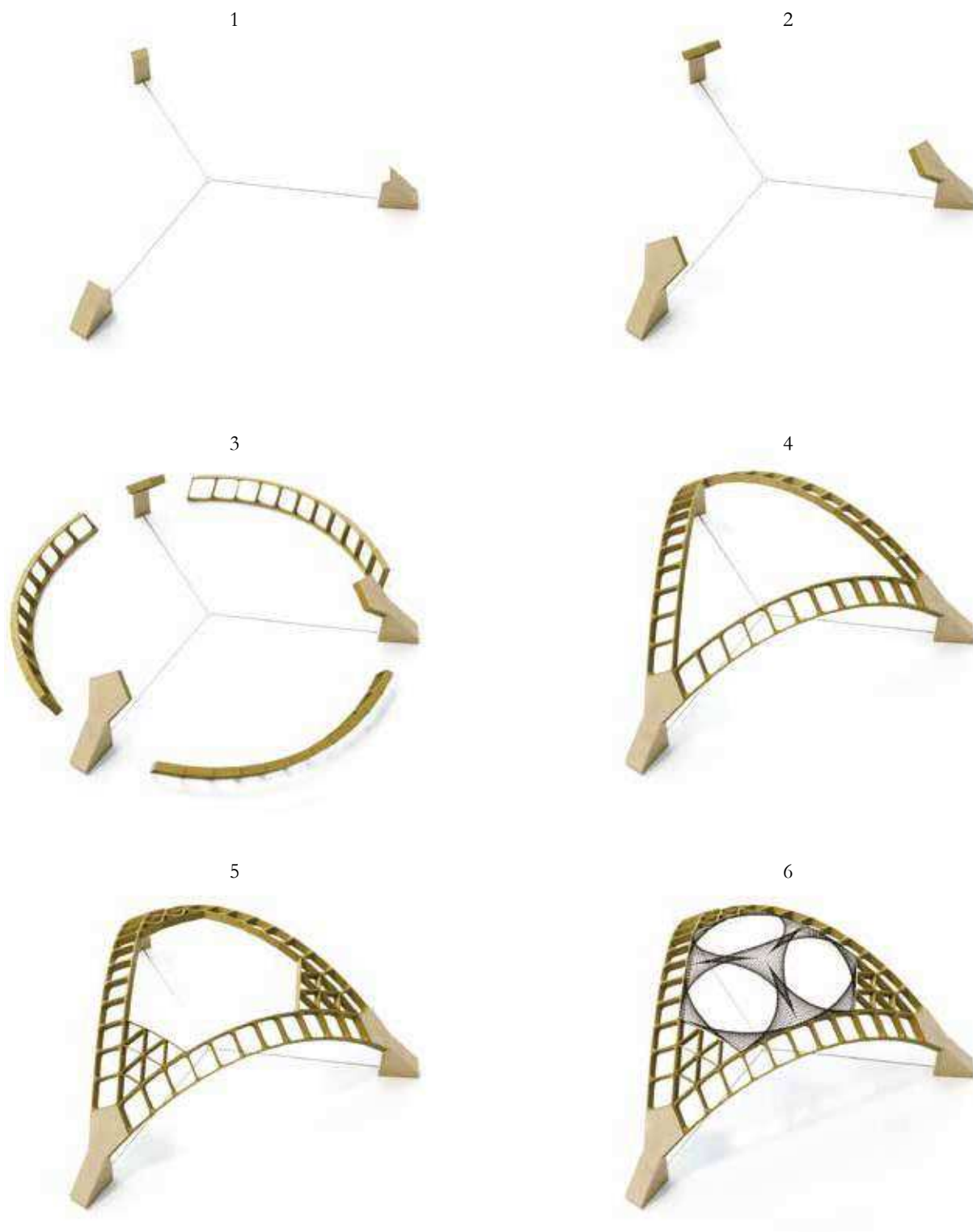
Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi

Fig. 183. Schema delle
fasi di assemblaggio del
tripode.





Figg. 184-190 (accanto e alla pagina seguente). La prova di assemblaggio del tripode presso Tarricone Prefabbricati.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi



7.2.6. Considerazioni finali

Costruire un prototipo in scala reale ha permesso di effettuare alcune considerazioni sia sull'applicazione dell'*additive manufacturing* a questo caso studio, sia sul sistema costruttivo adottato.

La stampa 3D FDM si è dimostrata molto più congeniale alla realizzazione di pezzi che richiedevano una certa precisione: in questo caso, infatti, il processo di fabbricazione è molto più controllabile rispetto alla stampa LDM, che richiede una costante attenzione per via di possibili cambiamenti di densità dell'impasto estruso o della presenza di bolle d'aria. Tuttavia si sono dovuti affrontare altri problemi legati a questo tipo di processo di fabbricazione, come lo *stringing* o il *warping*, ma anche le deformazioni causate da quest'ultimo fenomeno – la superficie inferiore di alcuni conci risultava leggermente imbarcata – non hanno provocato cambiamenti della geometria tali da compromettere l'efficienza statica della struttura. Anche l'assenza del ritiro ha fatto in modo che non ci fosse una rilevabile discrepanza tra il modello digitale e quello fisico.

A fronte della maggiore precisione e affidabilità della stampa FDM rispetto a quella LDM, però, bisogna evidenziare che la prima richiede tempi di fabbricazione notevolmente più lunghi. Inoltre è doveroso precisare che il PLA, impiegato in questo caso, non è un materiale da costruzione – diversamente dall'argilla – ma è adatto esclusivamente a installazioni o strutture temporanee.

Il sistema costruttivo messo a punto, che prevede il fissaggio reciproco dei blocchi con viti e bulloni, si è dimostrato pratico ed efficace: l'assemblaggio della struttura richiede, infatti, poche ore in totale, non sono necessarie né centine né malte e il prototipo è perfettamente smontabile. In questo caso specifico, per cui si sono realizzati i blocchi cavi in materiale plastico, i componenti sono risultati particolarmente leggeri, perciò non sono state necessarie neanche impalcature o gru, tuttavia questo cambierebbe se si decidesse di realizzare i pezzi stampando con malte a base di polveri lapidee o se si decidesse di completare tutti i cassettoni con la lastra di pietra all'estradosso. In ogni caso, anche se potrebbero essere necessari macchinari per la movimentazione e di sostegni per prevenire il collasso della struttura incompleta, non sarebbero necessarie centine costose e complesse per la posa in opera.

Figg. 191-194 (alle pagine seguenti). Lo Stereotomic Tripod esposto alla mostra *Marmomac Meets Academies* 2023.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi





Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 7. Una proposta per spazi voltati cassettonati innovativi



Politecnico di Bari, dipartimento di Architettura, Costruzione e Design (ArCoD)
Dottorato di ricerca in Conoscenza e Innovazione nel Progetto per il Patrimonio
XXXVI ciclo, Novembre 2020 - Gennaio 2024
Curriculum: Costruzione



Capitolo 8

Stampa con un materiale innovativo che sfrutti gli scarti di cava

Un importante campo di indagine inerente all'uso della stampa 3D per la costruzione riguarda un miglioramento del processo di fabbricazione dal punto di vista dell'ecosostenibilità. Tra le strategie maggiormente investigate vi è l'utilizzo di materiali innovativi e a basso impatto ambientale, che prevedano il riutilizzo di scarti di altri tipi di lavorazione.

Di seguito si presenta una sperimentazione attualmente in corso, che vede coinvolte anche alcune aziende del settore dell'*additive manufacturing* e della lavorazione della pietra e che prevede la realizzazione di un prototipo stampato in 3D usando una malta in parte costituita da polveri lapidee ottenute come scarto di lavorazioni di cava.

Tale ricerca prosegue in una direzione già tracciata nel corso degli studi svolti presso il dipartimento di Architettura del Politecnico di Bari, che riguarda l'innovazione del materiale lapideo non solo dal punto di vista tecnologico, ma anche nell'ottica di una costruzione più *green*.

8.1. Da Vinci's Bridge

8.1.1. Introduzione

Quello del Da Vinci's Bridge è un progetto a cui la scrivente ha avuto modo di collaborare. Esso ha visto coinvolti anche il prof. Giuseppe Fallacara, il prof. Nicola Parisi, il collega dottorando Angelo Vito Graziano, l'azienda WASP e l'azienda B&Y di Vincenzo Gurrado.

Come si può intuire dal nome, si tratta del prototipo di un piccolo ponte pedonale ispirato, nella forma, al ponte progettato da Leonardo da Vinci nel 1502 per congiungere Pera – l'attuale quartiere Galata di Beyoğlu – con Costantinopoli – attuale Istanbul¹¹⁹. Pera, infatti, era separata da Costantinopoli dal Corno d'oro, un canale che il ponte doveva attraversare. Il ponte di Leonardo consisteva in un arco ribassato che si biforcava alle due estremità e, stando alla descrizione che lo stesso progettista aveva inviato al sultano Bayezid II insieme ai propri disegni, la struttura doveva essere larga quaranta braccia (circa 23 m), alto settanta braccia (circa 41 m)

¹¹⁹ Airaldi, G., *Il ponte di Istanbul: un progetto incompiuto di Leonardo da Vinci*, Bologna, Marietti 1820, 2020.

e lungo seicento braccia (circa 350 m)¹²⁰.

Il Da Vinci's Bridge, invece, pur riprendendone le forme, presenta dimensioni molto più modeste (circa 6 m di luce).

La sperimentazione è ancora in corso, perciò il modello in grande scala non è ancora stato completato, anche se è stato predisposto il progetto esecutivo e si sono stampati due dei tredici conci.

8.1.2. Il progetto

Un primo modello 3D è stato realizzato dal prof. Fallacara tramite il software Rhinoceros. Esso copre una luce di 6,7 m, è alto 1 m ed è stato suddiviso in nove conci. Inoltre, alle estremità, laddove il progetto di Leonardo prevedeva una biforcazione, il modello si allarga per accogliere dei gradini scavati direttamente nei blocchi (fig. 196).

¹²⁰ Ibid.

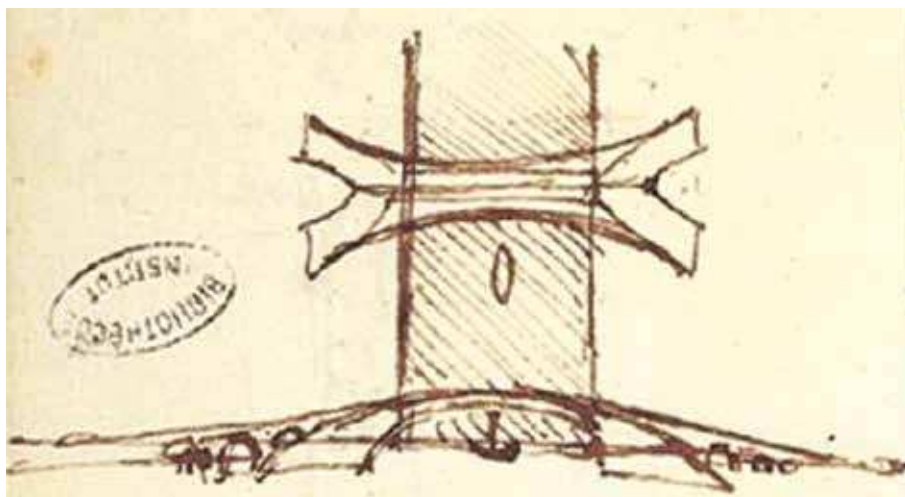


Fig. 195. Lo schizzo di Leonardo Da Vinci del ponte da lui progettato.



Fig. 196. Il primo modello 3D del Da Vinci's Bridge.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 8. Stampa con un materiale innovativo che sfrutti gli scarti di cava

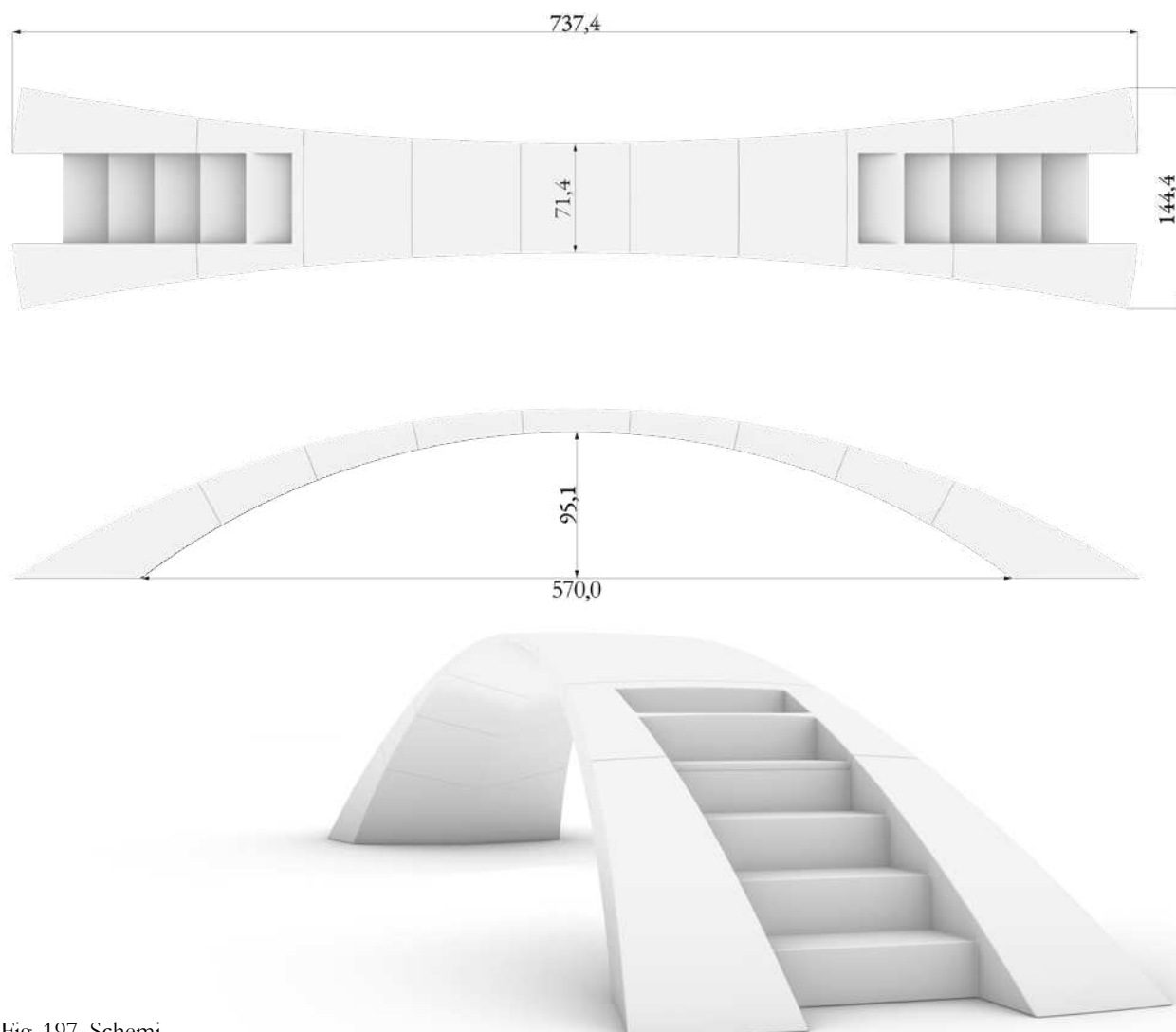


Fig. 197. Schemi tridimensionali del Da Vinci's Bridge.

I giunti dei conci sono stati pensati per permettere alla struttura di avere un comportamento stereotomico, perciò sono stati disposti in maniera radiale, con una giacitura ortogonale alle isocurve¹²¹ generatrici, in modo da permettere al sistema di lavorare a compressione.

Tuttavia è stato necessario rendere il modello esecutivo, affrontando una serie di questioni legate alla sua stampabilità, ad alcuni limiti del materiale, alle dimensioni del piatto di stampa, ecc. Di questa fase di ottimizzazione

¹²¹ In Rhinoceros si definiscono isocurve le curve isoparametriche, ossia le curve aventi un valore di U o V costante su una superficie. Informazioni più dettagliate si possono trovare online, nella documentazione ufficiale del software (https://docs.mcneel.com/rhino/mac/help/it-it/popup_moreinformation/isocurve.htm).

si è occupata la scrivente.

Per prima cosa si è dovuto stabilire con che macchinario fabbricare i pezzi, in modo da avere un riferimento per il dimensionamento. Si è optato per una Delta WASP 3 mt concrete – simile alla stampante usata per lo Stereotomic Tripod ma dotata di un ugello adatto al cemento – la quale ha un volume di stampa cilindrico, con un'altezza di 1 m e un diametro di base di 1 m.

Subito ci si è resi conto che i quattro pezzi più grandi – quelli posti alle estremità e scavati con i gradini – non rientravano all'interno del volume di stampa perché troppo larghi. Per evitare un rimpicciolimento eccessivo del modello si è ritenuto opportuno dividerli a metà.

Prima di entrare nei dettagli riguardanti la stampa si è ipotizzato un sistema costruttivo per far funzionare la struttura.

Per prima cosa si è ragionato sui giunti: difficilmente la stampa 3D LDM consente di ottenere oggetti identici al modello digitale per via delle deformazioni legate al ritiro – come si è visto con la Stereotomic Green Vault – e questo può portare a una non perfetta aderenza reciproca tra i conci. Questo fenomeno si è osservato nello Striatus Bridge, dove esisteva una vera e propria divergenza tra i pezzi e ciò ha provocato una distribuzione dei carichi non uniforme, col conseguente insorgere di fenomeni fessurativi. Era necessario, dunque, trovare un sistema per favorire una corretta distribuzione delle forze sull'intera sezione del concio ed evitare il sovraccarico solo in alcuni punti. Si è pensato di incollare alle facce dei giunti di tutti i conci delle piastre spesse due centimetri e stampate in PLA. Ciascun giunto, quindi, comprende due piastre, tra le quali è possibile porre della malta o un altro materiale di riempimento in caso di divergenza o mancata adesione dei blocchi. In questa maniera si può garantire una corretta distribuzione dei carichi.

Fig. 198. Schema del sistema di piastre in corrispondenza dei giunti.



Successivamente si è passati alla progettazione dell'attacco a terra. Si è pensato di realizzare delle spalle da stampare in 3D in PLA a cui fissare un tirante che consenta di scaricare i carichi di compressione dell'arco.

In seguito si è valutata la modalità di stampa dei conci. In questo caso la geometria non prevedeva conci cavi con i *layer* disposti parallelamente alle pressioni: la condizione ideale è fare in modo che gli strati si mantengano sempre ortogonali alle forze poiché i materiali stampati in 3D non hanno un comportamento isotropo e sono più resistenti a compressione nella direzione ortogonale ai *layer*.

A tal proposito si è preso a modello lo Striatum Bridge, descritto nel quinto capitolo, che è stato realizzato con layer non paralleli, disposti in maniera radiale proprio per questo motivo.

Un accorgimento del genere non può essere adottato con un comune software di *slicing* come Simplify3D – che dà la possibilità di utilizzare strati orizzontali – ma è necessario impiegare programmi di modellazione parametrica per disegnare direttamente il percorso macchina sottoforma di curve ottenute direttamente dal solido.

A questo punto si sono dovute affrontare una serie di questioni:

- come disegnare le curve di sezione non parallele;
- che tipo di *infill* utilizzare per i vari blocchi;
- che dimensione di ugello impiegare, in modo da regolare di conseguenza il percorso macchina;
- verificare che tutte le parti dei conci fossero stampabili;
- come ottenere un percorso unico, senza che la macchina si fermasse a ciascun livello e ripartisse al successivo, in modo da evitare imperfezioni sulla superficie dei blocchi. Per la Stereotomic Green Vault è stata usata la *vase mode* la quale, tuttavia, prevede che si tracci solo il perimetro di un oggetto senza riempimento e senza la possibilità di aumentare lo spessore della superficie di bordo. In questo caso, invece, era necessario un *path* più complesso, che comprendesse sia eventuali rinforzi interni sia eventuali perimetri multipli.

Per poter rappresentare delle curve di sezione non parallele si è adoperato

Grasshopper. Esiste, infatti, un componente che consente di suddividere una superficie con curve equidistanti che seguano l'andamento delle isocurve in direzione U o V. Si è, quindi, esploso uno dei blocchi e si sono scelte due delle facce laterali. Prima di poter adoperare la suddivisione tramite isocurve è stato necessario ricostruire le superfici con il comando *RebuildUV* di Rhinoceros, in modo che le isocurve stesse creassero una griglia regolare.

A questo punto si è adoperata la suddivisione in curve di sezione equidistanti. Sulle due facce scelte le curve risultano complanari e si sono sfruttate proprio per calcolare la giacitura di un piano di sezione a ciascuna quota. Disegnando quei piani è possibile tagliare il solido intero e ricavare le curve di sezione intere.

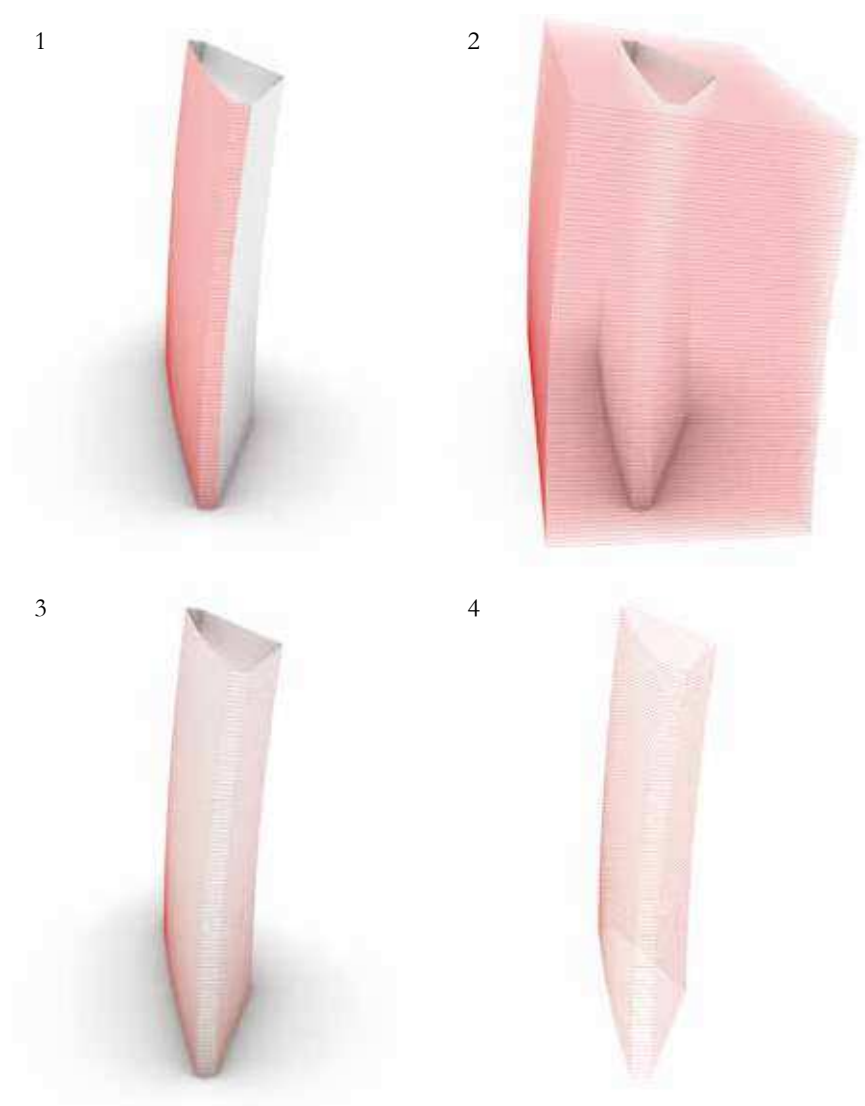


Fig. 199. Schema del processo di ottenimento delle curve non parallele.

L'insieme di curve ottenute in questa maniera permette di rappresentare solo la superficie perimetrale dei conci, però è possibile applicare lo stesso principio di taglio attraverso piani non paralleli anche a solidi o polisuperfici più complesse. L'ideale è rappresentare dei solidi che comprendano anche la trama di *infill*.

In questo caso si è ritenuto opportuno tracciare due perimetri concentrici e inserire tre rinforzi interni che congiungessero il lato di estradosso e quello di intradosso e che seguissero l'andamento delle isocurve longitudinali. Avendo concordato con WASP che si sarebbe usato un ugello di 17 mm, si sono regolati di conseguenza tutti gli spessori del guscio esterno e dei sostegni. Perciò sia al primo che ai secondi è stato dato uno spessore proprio di 17 mm, che è la distanza che intercorre tra una linea di materiale e l'altra. Inoltre si è potuto calibrare l'altezza media dei *layer*, impostata pari alla metà della dimensione del *nozzle*, quindi pari a 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.

Si sono anche ridisegnati i gradini: i loro margini laterali erano stati modellati rettilinei e si è ritenuto opportuno far seguire anche a essi l'andamento delle isocurve. Nello specifico si sono disegnati proprio in corrispondenza dei due sostegni laterali. Inoltre, dopo essersi interfacciati con WASP, è emersa la problematicità degli sporti dei gradini in fase di stampa: per questo si sono sagomate nuovamente le alzate e le pedate in maniera tale che formassero angoli ottusi anziché retti e le loro pendenze fossero abbastanza dolci da poter essere stampate senza sostegni (fig. 200).

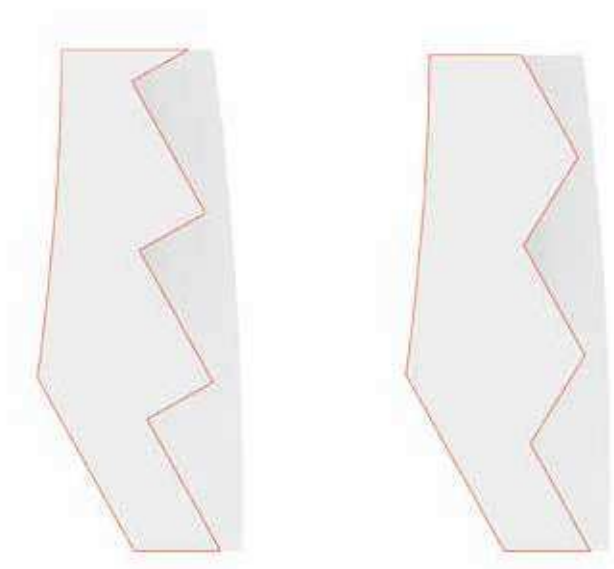
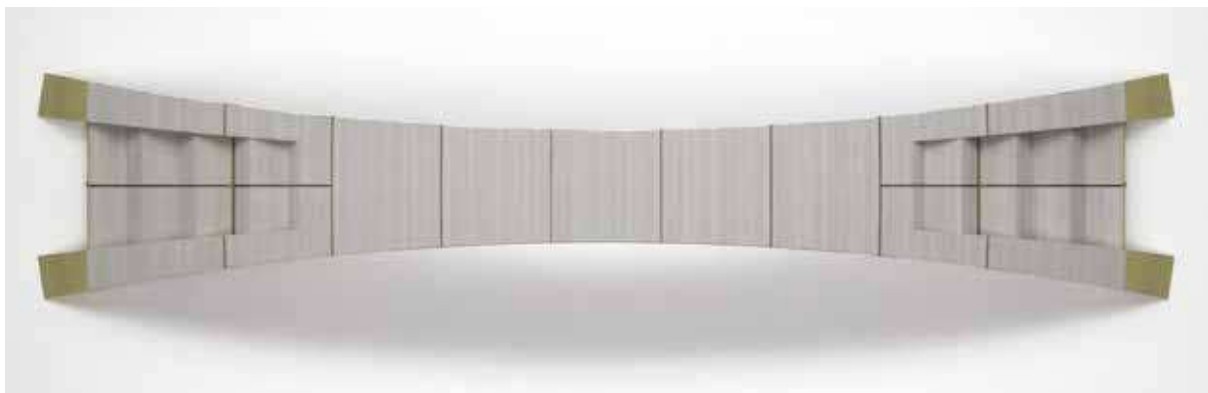


Fig. 200. La pendenza dei gradini prima e dopo l'ottimizzazione.



A questo punto si è affrontato il problema del creare un unico percorso macchina. È stato fornito da WASP un codice Grasshopper che permette di creare una curva unica a partire da una serie di curve di sezione di un oggetto, collegandole tra loro con delle piccole rampe. Per poter ottenere la spirale con le rampe dei cinque conci semplici si è operato in questo modo:

- si sono disegnate la curva perimetrale e la curva di *infill* per entrambe le basi dei conci;
- si sono estratti due degli spigoli dei conci pieni;
- si è effettuato uno *sweep* a due binari impostando come binari gli spigoli e come curve di sezione le due basi;

Figg. 201-202. Il ponte dopo le modifiche legate all'ottimizzazione.

- si è applicato alle polisuperfici ottenute l'algoritmo di Grasshopper per ottenere le curve di sezione radiali;
- si è applicato ai vari set di curve l'algoritmo di Grasshopper per collegare le curve tramite rampe.

Per i conci con i gradini, invece, il procedimento è stato un po' più complesso. Innanzitutto è stato necessario dividerli a metà, mantenendo una tolleranza – che, su indicazione di WASP, è stata di 20 mm – e poi, dopo aver utilizzato il procedimento descritto prima per modellare il mezzo concio, è stato necessario modificare la polisuperficie tagliandola e unendola con i gradini. Solo dopo questa operazione si sono potuti

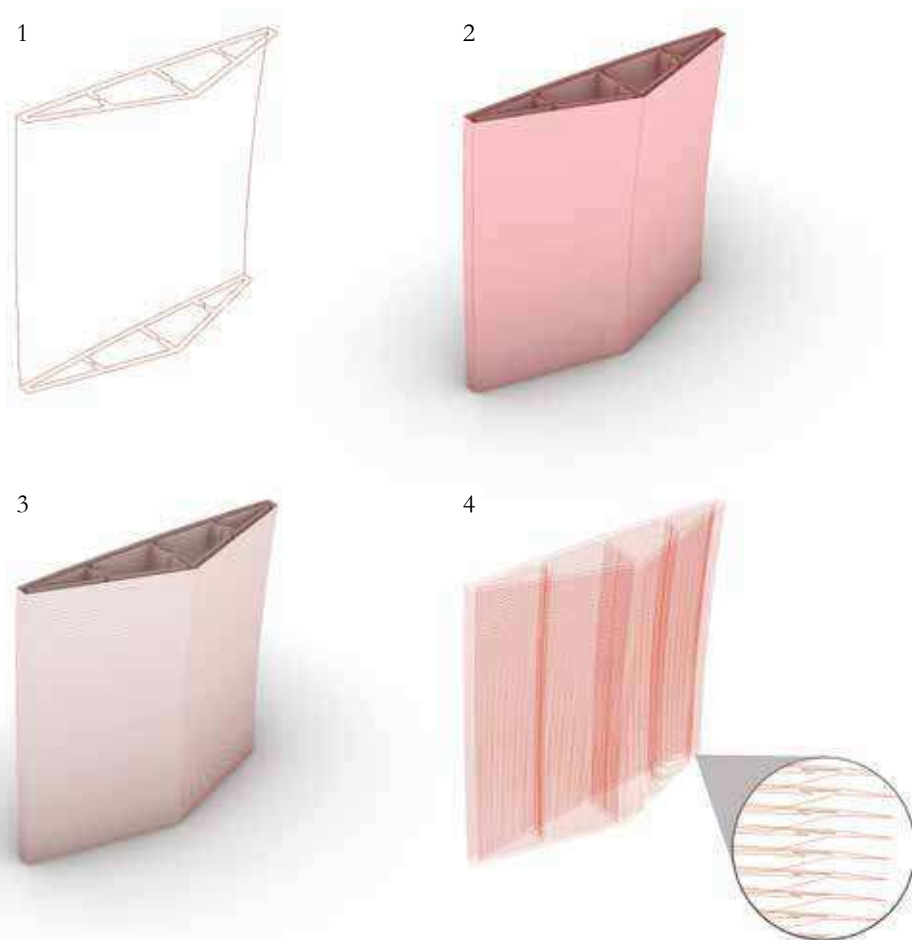


Fig. 203. Schema delle fasi di modellazione per l'ottenimento di un'unica polilinea corrispondente al percorso macchina. Nell'ingrandimento è possibile vedere uno zoom sui collegamenti continui tra i *layer* tramite rampe.

impiegare gli algoritmi di Grasshopper.

Una volta ottenute le curve, corrispondenti al *path* che l'ugello deve seguire, è possibile utilizzare un ulteriore codice Grasshopper messo a punto da WASP per ricavarne il g-code¹²² per la stampa.

8.1.3. Prova di stampa di un modello in scala in argilla

Per verificare che lo *slicing* per *layer* non paralleli funzionasse e fosse stampabile si è deciso di realizzare un plastico in scala 1:5 in argilla utilizzando la stampante Delta WASP 40 100 clay del FabLab Poliba.

Si è scelto un ugello da 4 mm, il più adatto a replicare in proporzione il corretto spessore delle linee di materiale (in scala 1:5 avrebbe dovuto essere di 3,4 mm).

La scelta del materiale di stampa per la maquette è ricaduta sull'argilla perché avrebbe richiesto una tecnologia LDM e avrebbe potuto, almeno in parte, simulare il processo di fabbricazione dei pezzi in scala reale. Tuttavia l'argilla non si è dimostrata un materiale adatto per via del ritiro consistente che subisce in fase di asciugatura.

Come si è visto con l'esempio della Stereotomic Green Vault, l'argilla tende a ridurre il proprio volume in maniera disomogenea se le masse non sono distribuite uniformemente intorno al centro dell'oggetto stesso. In questo caso la forma stretta e lunga e la presenza dei rinforzi trasversali interni (geometrie non concentriche) ha causato deformazioni troppo consistenti che, spesso, hanno provocato la fessurazione o addirittura la rottura dei pezzi (figg. 204-206).

Nonostante ciò, è stato possibile appurare che i *layer* non paralleli venivano stampati correttamente.

¹²² Il g-code è un codice testuale che fornisce alla macchina le istruzioni per la stampa: la temperatura, il flusso di materiale, la velocità di stampa e la sequenza di coordinate che l'ugello deve raggiungere per completare un oggetto. Si chiama così perché le istruzioni di posizione sono composte dalla lettera G seguita dalle coordinate.

Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 8. Stampa con un materiale innovativo che sfrutti gli scarti di cava

Figg. 204-206.

Fotografie dei conci stampati in argilla. Si possono osservare le lesioni dovute al ritiro di materiale in fase di asciugatura.



8.1.4. Prova di stampa di alcuni conci in scala reale

Dopo il tentativo di stampa in piccola scala, si sono mandati i file esecutivi dei conci a WASP affinché effettuassero dei test di stampa con la Delta WASP 3 mt concrete.

Uno degli scopi di questa sperimentazione è quello di mettere a punto un nuovo materiale *green*, per il quale si sfruttino scarti della lavorazione della pietra, come polveri lapidee.

Sono state fornite dall'azienda B&Y di Vincenzo Gurrado – un'azienda che si occupa di lavorazione della pietra – delle polveri di marmo ottenute come materiale di scarto. WASP ha ottenuto un impasto nuovo additivando una malta già usata in passato – la GeoCalce G Antisismico di Kera Koll –

con una percentuale pari al 30% di queste polveri. Si è riusciti a stampare due conci, che sono stati esposti al Marmomac Meets Academies 2023.

Uno dei due è stato stuccato per metà, per mostrare la possibilità di levigare il pattern della layerizzazione.

Il concio stampato pesa circa 70 kg. Si è effettuata con WASP una stima del materiale e del tempo necessario per la realizzazione di tutti i blocchi: si è stimato, sulla base della lunghezza delle curve a spirale, del flusso di materiale e della velocità di stampa di solito impostata, che tutti i pezzi necessitano di un tempo di fabbricazione di 1-2 ore e che il loro peso varia da circa 50 kg a 100 kg.

Figg. 207-211. Uno dei conci a scala reale stampati da WASP.



Ilaria Cavaliere

Stampa 3D per l'architettura: manifattura additiva per la progettazione stereotomica

Parte terza

Cap. 8. Stampa con un materiale innovativo che sfrutti gli scarti di cava



Fig. 212. Fasi di assemblaggio del prototipo alla scala reale.

Per quanto riguarda il futuro assemblaggio dell'intero prototipo alla scala reale si è pensato a una centina lignea costituita da tavole di pioppo fresate appoggiate su una base in tavolato e sollevate da terra. Su di esse vengono posizionati i conci partendo dalle spalle – collegate tra loro dal cavo di acciaio in tensione –, vengono riempiti di malta i giunti tra le piastre in PLA e poi la centina può essere abbassata e rimossa (fig. 212).

8.1.5. Considerazioni finali e sviluppi futuri

Nonostante questa esperienza non si sia ancora conclusa, ha già permesso di riflettere su alcune questioni.

A differenza dei due esempi precedenti, questa sperimentazione si è

rivelata molto più complessa dal punto di vista della realizzazione per via della necessità di ottenere dei *layer* non paralleli. Per la Stereotomic Green Vault e lo Stereotomic Tripod l'unica difficoltà in fase di modellazione è consistita nel fare in modo che i conci avessero la parte inferiore piana, affinché la stampa si potesse effettuare per *layer* orizzontali e lo *slicing* si potesse impostare tramite un software comune. In questo caso, invece, la necessità di avere una stratificazione radiale che asseconasse l'andamento delle tensioni ha imposto una modalità di *slicing* più elaborata, che ha richiesto un processo di ottimizzazione più complesso e l'uso di software di modellazione parametrica. A fronte di una performance ottimale del dimostratore finale, dunque, sono necessarie delle competenze molto più specifiche e approfondite.

È, inoltre, doveroso sottolineare che la resa dei conci per ora ottenuta non è ancora perfetta poiché i blocchi presentano una sottoestrusione in corrispondenza dell'estradosso e una sovraestrusione in corrispondenza dell'intradosso per via della distanza variabile tra i layer. Una delle priorità nella prosecuzione della ricerca è proprio risolvere questo problema permettendo al flusso di materiale o alla velocità di variare al variare della distanza reciproca tra i layer. Se si sceglierà di modificare il flusso, esso dovrà aumentare laddove gli strati sono più distanti, mentre se si deciderà di far variare la velocità, l'ugello dovrà rallentare laddove gli strati sono più distanti per dare il tempo alla macchina di depositare più malta. Questa modifica andrà fatta sempre attraverso Grasshopper, modificando il codice utilizzato per generare il g-code: poiché la velocità o il flusso sono dati da valori numerici costanti, bisognerà trasformare queste costanti in variabili. Tale operazione aggiungerà un ulteriore livello di complessità alla gestione della fabbricazione. La scelta tra velocità e flusso avverrà tramite dei test, che permetteranno di capire con che metodo si ottiene un risultato migliore.

Alcune considerazioni vanno fatte anche sul materiale. I due conci stampati finora non sembrano aver subito deformazioni significative, tuttavia bisognerà valutare la bontà della malta soprattutto per i pezzi più grandi e irregolari, ossia quelli con i gradini. Inoltre si effettueranno dei test a rottura su dei provini per valutare la resistenza effettiva del materiale. Infine, sarà soltanto con un test di montaggio del prototipo in scala reale che si potrà valutare l'effettiva bontà del sistema di giunti messo a punto.



PARTE QUARTA



Capitolo 9

Conclusioni

Alla fine di questo percorso di ricerca è doveroso riassumere tutti gli argomenti affrontati e i contributi forniti dalla scrivente.

- Nella prima parte si è introdotta la stereotomia dal punto di vista della sua evoluzione storica, delle nozioni base e dell'attuale rinato interesse nei suoi confronti. Ciò è utile per contestualizzare il lavoro all'interno dello specifico ambito architettonico di riferimento, rendendo anche esplicite le ragioni della scelta di investigare l'applicazione della stampa 3D a questa disciplina. Tra le principali vi è la possibilità di lavorare con sfridi di materiale minimo e di esplorare geometrie difficilmente ottenibili tramite fabbricazione sottrattiva.
- Nella seconda parte, dopo una panoramica sulla manifattura additiva nella storia e sullo sviluppo della tecnologia di stampa 3D, si è entrati nel dettaglio della sua applicazione al settore architettonico. Si è effettuata una catalogazione delle opere ritenute più significative suddividendole in categorie (edilizia civile, edilizia extraterrestre, infrastrutture, installazioni di grandi dimensioni) e ordinandole cronologicamente. Per ciascuna opera selezionata sono stati indicati – laddove possibile – la specifica tecnologia di stampa e i materiali impiegati. Tale catalogazione non ha la pretesa di essere né completa né esaustiva, ma è stata effettuata con lo scopo di raccogliere quante più informazioni possibili sul tema della stampa 3D di grandi dimensioni per provare a individuare problemi già affrontati, traguardi raggiunti, potenziali sviluppi. È importante sottolineare che, essendo questa una tecnologia relativamente nuova nel settore edile, la letteratura in materia non è ancora vasta, perciò un'operazione di raccolta di informazioni e la loro sistematizzazione è stata ritenuta utile.
- Si è, inoltre, effettuato un approfondimento sull'uso dell'*additive manufacturing* nella stereotomia, analizzando alcuni casi studio nel dettaglio. Ciò è stato utile per poter riflettere su alcune potenzialità e alcuni limiti e sfruttare le conoscenze acquisite per la progettazione e realizzazione dei prototipi.
- Nella terza parte si è descritta in maniera approfondita tutta la componente “pratica” della ricerca, ossia la progettazione e la realizzazione dei dimostratori. Le sperimentazioni sono state

riportate a partire dalla fase di modellazione e ottimizzazione fino alla fabbricazione, menzionando anche eventuali problemi riscontrati e la loro risoluzione.

- I tre dimostratori hanno permesso di affrontare diversi aspetti della stereotomia stampata in 3D, tra cui il diverso comportamento di materiali fluidi e non, la possibilità di costruire senza l'uso di centine o l'ottimizzazione del comportamento meccanico della struttura attraverso uno *slicing* ad hoc.
- È importante ribadire che un approccio pratico è fondamentale nell'ambito dell'architettura e del design, settori in cui non è possibile applicare il metodo scientifico e non è possibile giungere a conclusioni univoche per via della forte componente soggettiva che li caratterizza. Lavorare con dei prototipi consente di perfezionare gradualmente un progetto, osservandone pregi e difetti e affrontando progressivamente la risoluzione di eventuali problemi. Soprattutto nel caso di geometrie complesse e di tecnologie innovative la sola simulazione digitale non risulta sufficiente poiché, come si è visto anche con le esperienze descritte, possono sopraggiungere questioni di natura empirica che richiedono un intervento a posteriori.
Quindi, perché una ricerca di questo tipo risulti credibile, è necessario che si concretizzi in uno o più prototipi i quali, pur non rappresentando soluzioni univocamente accettabili, possono dimostrare in maniera oggettiva la fattibilità di tali soluzioni.

A seguito della fase di ricerca teorica e di sperimentazione pratica è possibile riassumere anche vantaggi e svantaggi riscontrati nell'uso della stampa 3D applicata alla stereotomia.

Sicuramente tra i vantaggi più significativi vi è la versatilità della tecnologia, che permette di avere un alto grado di customizzazione senza spreco di materiale ausiliario, come avverrebbe utilizzando degli stampi. Inoltre la fabbricazione additiva non impone l'uso di geometrie piene, come invece può accadere con le tecniche di lavorazione tradizionali – per via di limiti tecnici o per quantità di sfrido che renderebbero la produzione poco sostenibile – e ciò può rivelarsi utile sia da un punto di vista estetico sia statico, perché permette di ottenere oggetti più leggeri e, dunque, più facilmente trasportabili e assemblabili.

La possibilità di ottenere blocchi leggeri unita alla versatilità geometrica ha consentito di sperimentare un metodo di assemblaggio innovativo, che prevede l'uso di viti e bulloni per il fissaggio reciproco dei conci e non necessita di centine, con un conseguente risparmio consistente di materiale di risulta.

Tra gli svantaggi riscontrati si annovera innanzitutto l'impossibilità di ottenere oggetti perfettamente sovrapponibili ai loro gemelli virtuali quando vengono utilizzati materiali fluidi: le deformazioni legate al ritiro, infatti, possono portare a scompensi più o meno consistenti, seppur per alcuni materiali ciò risulti meno evidente che per altri – il fatto che l'argilla subisca deformazioni importanti non implica che lo stesso avvenga per la malta cementizia. Questo fenomeno può essere parzialmente contrastato con una progettazione consapevole, la quale, tuttavia, impone dei limiti a livello geometrico.

I materiali fluidi impediscono anche l'uso di strutture di supporto in fase di stampa e questo rappresenta un altro importante fattore che restringe il range di forme ottenibili.

Una maggiore precisione si può ottenere con i materiali non fluidi, ossia quelli che richiedono una tecnologia FDM: essi non solo sono compatibili con l'utilizzo dei supporti, ma non presentano il problema del ritiro poiché non devono asciugarsi dopo la fabbricazione.

Tuttavia la tecnologia FDM supporta soprattutto vari tipi di plastica, che è un materiale adatto a soluzioni architettoniche temporanee ma non a strutture permanenti.

Le esperienze presentate riguardano esclusivamente la stampa 3D tramite estrusione per via delle macchine disponibili presso i laboratori del Politecnico di Bari e delle collaborazioni instaurate con WASP. Uno sviluppo interessante, tuttavia, riguarderebbe l'uso della tecnologia *binder jetting* che, oltre a fornire un'estrema libertà formale, permetterebbe di utilizzare in maniera consistente polveri lapidee ottenute come scarto di lavorazioni di cava.

Per concludere, un'importante considerazione va fatta in merito al tipo di contributo dato alla ricerca sul tema. L'interesse verso la stampa 3D di grandi dimensioni si sta rapidamente diffondendo in molti centri di ricerca e istituti a livello mondiale, che hanno a disposizione risorse economiche e tecnologiche notevolmente superiori a quelle impiegate durante questa ricerca.

Tuttavia si può asserire che il materiale avuto a disposizione, pur nella sua limitatezza, ha comunque permesso di elaborare spunti e di porre le basi pratiche e teoriche per consentire lo sviluppo futuro della ricerca, garantendo l'elaborazione di ulteriori riflessioni critiche e avanzamenti.

Bibliografia e sitografia

Capitolo 1

Sito web del Parlamento Europeo:

<https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20191115STO66603/l-ue-e-l-accordo-di-parigi-verso-la-neutralita-climatica>).

Sito web della Commissione Europea: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/industry-and-green-deal_it.

Pagina web del New European Bauhaus:

https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en?ettrans=it&prefLang=it.

Capitolo 2

Barberio, M., *Nuove frontiere dell'architettura in pietra. Progettazione parametrico-computazionale, 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.

Bares, M. M., *La Vis de Saint-Gilles del castello Maniace di Siracusa: un'audace sperimentazione di stereotomia*, in *LEXICON: Storie e Architettura in Sicilia*, n. 4, 2007, pp. 15-23.

D'Amato Guerrieri, C., *Studiare l'Architettura. Un vademecum e un dialogo*, Roma, Gangemi Editore, 2007.

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

Guerrieri.

Fallacara, G., *Verso una progettazione stereotomica*, Roma, Aracne editrice, 2007.

Fallacara, G., *Stereotomia Ri-composta. Evoluzione di una disciplina che insegna a costruire lo spazio*, Roma, Aracne Editrice, 2012.

Fallacara, G., Gadaleta, R., *Stereotomy: Architecture and Mathematics*, in Sriraman, B. (a cura di), *Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences*, Cham, Springer, 2019.

Fallacara, G., Barberio, M., *An Unfinished Manifesto for Stereotomy 2.0*, in *Nexus Network Journal*, n. 20, issue 3, 2018, pp. 519-543

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.

Galletti, S., *Stereotomy and the Mediterranean: Notes Toward an Architectural History*, in *Mediterranea International Journal on the Transfer of Knowledge*, vol. 2, pp. 73-120.

Montalbano, C., *Verso il Mediterraneo. Luci e ombre della dimensione Mediterranea della scuola di Architettura di Bari*, in 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, pp. 281-294.

Nobile, M. R., Garofalo, E., *Stereotomy of the late-medieval Mediterranean. Crossroads of experimental design*, in *Proceedings of the Fifth International Congress on Construction History Polmer House Hilton Hotel (Chicago, IL, 3-7 giugno 2015)*, vol. 3, 2015, pp. 239-246.

Trevisan, C., *Le proporzioni nascoste nel trait della trompe di Anet*, in *Disegnare idee immagini*, vol. 16, 1999, pp. 59-66.

Trevisan, C., *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Roma, Aracne editrice, 2011.

Capitolo 3

Alessandrini, F., De Biaggio, N., Pedrocco, L., Reggiani, A., «Geopolimeri a media ed alta resistenza: il futuro sicuro e durevole delle costruzioni», *Ingenio*, 1 luglio 2020, <https://www.ingenio-web.it/articoli/geopolimeri-a-media-ed-alta-resistenza-il-futuro-sicuro-e-durevole-delle-costruzioni/>.

Arcella, F. G., Lessmann, G. G., *Casting Shapes*, 1989, brevetto US4818562.

Ciancio, D., Beckett, C., *Rammed earth: an overview of a sustainable construction*, in *Proceedings of the 3rd Sustainable Construction Materials and Technologies Conference. Sustainable construction materials and technologies* (Kyoto, Giappone, 18 agosto 2013), pp. 1-9, 2013.

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

Curth, A., «3-D Printed Concrete», in *Structures*, luglio 2022, <https://www.structuremag.org/?p=20944>.

Dini, E., *Method and device for building automatically conglomerate structures*, 2006, brevetto WO 2006/100556 A2.

Dini, E., *Improved method for automatically producing a conglomerate structure*, 2009, brevetto EP 2 203 286 B1.

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

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

Khoshnevis, B., *Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies*, in *Automation in Construction*, n. 13, 2004, pp. 5-19.

Khoshnevis, B., *Deployable Contour Crafting*, 2007, brevetto WO 2007/050968.

Lowes, F. J., *Apparatus for the preparation of elliptical structures*, 1968, brevetto US3376602.

Maddock, P. T., *Machine for building a dome or sphere* 1988, brevetto US4734021.

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 Construction*, n. 5, 1997, pp. 427-437.

Shahrubudin, N., Lee, T.C., Ramlan, R., *An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications*, in *Procedia Manufacturing*, n. 35, 2019, pp. 1286-1296.

Su, A., Al'Aref, S. J., *History of 3D Printing*, in Al'Aref, S. J., Mosadegh, B., Dunham, S., Min, J. K. (a cura di), *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, Elsevier, Academic Press, 2018, pp. 1-10.

Swainson, W. K., *Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product*, 1977, brevetto US4041476.

Urschel, E. W., *Molding and depositing machine for solidifiable plastic materials*, 1943, brevetto US2314468A.

Urschel, E. W., *Machine for building walls*, 1944, brevetto US2339892A.

Urschel, E. W., *Machine for building walls of plastic hardenable materials*, 1952, brevetto US2607100A.

Winn, J. B. Jr., *Monolithic wall forming apparatus*, 1959, brevetto US2877530A.

Winn, J. B. Jr., *Monolithic wall forming apparatus*, 1965, brevetto US3195208A.

Pagina web di RepRap: <https://reprap.org/wiki/RepRap>.

Capitolo 4

Anusci, V., «Russian startup Renca launches géobeton geocement for 3D printing construction», *VoxelMatters*, 25 marzo 2017, <https://www.voxelmatters.com/russian-startup-renca-launches-geobeton-geocement-3d-printing-construction-applications/>.

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

Blain, L., «Chinese company uses 3D printing to build 10 houses in a day», *New Atlas*, 23 aprile 2014, <https://newatlas.com/china-winsun-3d-printed-house/31757/>.

Block, I., «World's largest 3D-printed building completes in Dubai», *Dezeen*, 22 dicembre 2022, <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai>.

Burger, J., Lloret, E., Scotto, F., Demoulin, T., *Eggshell: Ultra-Thin Three-Dimensional Printed Formwork for Concrete Structures*, in *3D Printing and Additive Manufacturing*, n. 7, issue 2, 2020, pp. 47-59.

Carlson, C., «Kamp C completes two-storey house 3D-printed in one piece in situ», *Dezeen*, 22 dicembre 2010, <https://www.dezeen.com/2020/12/22/kamp-c-completes-two-storey-house-3d-printed-one-piece-on-site/>.

Chiusoli, A., *La prima casa stampata in 3D generata con la terra* | Gaia, sito web WASP, 2018, https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/?utm_term=&utm_campaign=IT-ita-SE-DSA-Sito&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3352968755&hsa_cam=16271447437&hsa_grp=136409042551&hsa_ad=583108545491&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-19959388920&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=EAIaIQobChMI7oiy-NWN_AIV-wIGAB3fLQNhEAAAYASAAEgLos_D_BwE.

Consoli, M., «Dior in 3D», *Abitare*, 10 gennaio 2022, <https://www.abitare>.

[it/it/design/2022/01/10/wasp-stampa-3d-temporary-store-dior-dubai/](https://www.researchgate.net/publication/358111111)

De la Fuente, A., Blanco, A., Galeote E., Cavalaro, S., *Structural fibre-reinforced cement-based composite designed for particle bed 3D printing systems. Case study Parque de Castilla Footbridge in Madrid*, in *Cement and Concrete Research* vol. 157, 2022.

De Matteis, M., Del Brocco, B., Figliola, A., *Rigenerare la città: il Social Housing come opportunità di rinnovo urbano e sociale*, Venezia, Università IUAV di Venezia, 2014.

Fallacara, G., *Osteomorphic Helicoidal Staircase*, in Fallacara, G. (a cura di), *Marmomac Meets Academies. Advanced research, lithic experimentation*, dossier di MD Journal, 2023, pp. 92-95.

Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G., Buchanan C., *Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge*, in *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 172, 2020.

Gaudillière, N., Duballet, R., Bouyssou, C., Mallet, A., Roux, P. et al., *Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars*, in *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, Springer International Publishing, 2018, pp.459-472.

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.

Harrouk, C., «Dubai Municipality to Become the World's Largest 3D-Printed Building», *ArchDaily*, 24 dicembre 2019, <https://www.archdaily.com/930857/dubai-municipality-to-become-the-worlds-largest-3d-printed-building>.

Hoffmann, A., «Watch Apis Cor 3d-print an Entire House in Just One Day», *Time*, 6 marzo 2017, <https://time.com/4692376/3d-printing->

[house-apis-cor.](#)

Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. C., Kim, J. R., *A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market*, in *Sustainability*, n. 12, 2020.

Jipa, A., Bernhard, M., Dillenburger, B., Aghaei-Meibodi, M., *3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs*, in Bieg, K. (a cura di), *2016 TxA Emerging Design + Technology*, atti della Texas Society of Architects 77th Annual Convention and Design Expo (San Antonio, Texas, 3-4-novembre 2016), 2016. pp. 96–107.

Kamin, D., «How an 11-Foot-Tall 3-D Printer Is Helping to Create a Community», *The New York Times*, 29 settembre 2021, <https://www.nytimes.com/2021/09/28/business/3D-printing-homes.html>.

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

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

Kleger, N., Fehlmann, S., Lee, S. S. et al., *Light-Based Printing of Leachable Salt Molds for Facile Shaping of Complex Structures*, in *Advanced Materials*, n. 34, 2022.

Leich, N., *3D Printing in Space*, in *Architectural Design*, vol. 84, issue 6, 2014, pp. 108-113.

Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., Nather, M., Otto, J., Krause, M., *Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing*, in *Automation in Construction*, n. 107, 2019.

Jipa, A., Aghaei Meibodi, M., Giesecke, R., Shammass, D., Leschok, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., *Smart Slab: Computational Design and Digital Fabrication of a Lightweight Concrete Slab*, in In Anzalone, P. Del Signore, M., *ACADIA 2018: Re/Calibration: On Imprecision and Infidelity*, atti della conferenza ACADIA 2018 (Città del Messico, Messico, 18-20 ottobre 2018), Association for Computer-Aided Design in Architecture

(ACADIA), 2018, pp. 320-27.

Menges, A., Reichert S., *Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects*, in *Architectural Design*, vol. 85(5), 2014, pp. 1-4.

Moretti, F., «WASP stampa in 3D un concept store unico in collaborazione con Dior», sito web di WASP, 8 novembre 2021, <https://www.3dwasp.com/concept-store-stampato-in-3d-wasp-dior/>.

Morgante, A., *Radiolaria Pavilion*, in Glynn, R., Sheil, B. (a cura di), *Fabricate 2011. Making Digital Architecture*, UCL Press, 2011, pp. 231-234.

Nielsen, D., *This 3D-Printed Village Aims to House 40% of Austin's Homeless Population*, in Dwell (online), 6 marzo 2020, <https://www.dwell.com/article/community-first-3d-printed-houses-icon-mobile-loaves-and-fishes-3f950815>.

Rota, D., «Una casa tutta d'un pezzo in Triennale», *Arketipo*, 25 novembre 2010, <https://www.arketipomagazine.it/una-casa-tutta-dun-pezzo-in-triennale/>.

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

Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., Laagland H. L. M., *Design of a 3D printed concrete bridge by testing*, in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 13(3), 2018.

Sher, D., «MENSE KORTE 3D prints modular building in Beckum», *Voxelmatters*, 9 agosto 2023, <https://www.voxelmatters.com/mense-korte-3d-prints-modular-building-in-beckum/>

Shuaingyu, H., «A Robot-3D Printed Concrete Book Cabin / Professor XU Weiguo's Team», *ArchDaily*, 1 aprile 2021, <https://www.archdaily.com/959283/a-robot-3d-printed-concrete-book-cabin-professor-xu-weiguos-team>.

Stott, R., «Chinese Company Showcases Ten 3D-printed Houses»,

ArchDaily, 2 settembre 2014, <https://www.archdaily.com/543518/chinese-company-showcases-ten-3d-printed-houses>.

Stott, R., «Chinese Company Constructs the World's Tallest 3D Printed Building», *ArchDaily*, 26 gennaio 2015, <https://www.archdaily.com/591331/chinese-company-creates-the-world-s-tallest-3d-printed-building>.

Subrin, K., Breessac, T., Garnier, S., Ambiehl, A., Paquet, E., Furet, B., *Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing*, in *IFAC Papers Online*, vol. 51, issue 11, 2018, pp. 716-721.

Vantighem G., De Corte, W., Shakour, E., Amir, O., *3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization*, in *Automation in Construction*, vol. 112, 2020.

Weizi, B., Xiaoxia, W., «The Story Behind the World's Longest 3D Printed Bridge», *Science and Technology Daily*, 5 agosto 2021, http://www.stdaily.com/English/ChinaNews/2021-08/05/content_1211436.shtml.

Yashar, M., Glasgow, C., Mehlomakulu, B., Ballard, J., O. Salazar, J., Maurer, S., Covey, S., *Mars Dune Alpha: A 3D-Printed Habitat by ICON / BIG for NASA's Crew Health and Performance Exploration Analog (CHAPEA)*, proceedings of the *ASCE Earth and Space 22 Conference* (Denver 26-28 aprile 2022), 2022.

«Binder Jetting vs. Material Jetting 3D Printing Whats the Difference?», *Xometry*, 30 settembre 2023, <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/binder-jetting-vs-material-jetting/>

Xu, W., Gao, Y., Sun C. and Wang, Z., *Fabrication and application of 3d-printed concrete structural components in the Baoshan Pedestrian Bridge project*, in Burry, J., Sabin, J., Sheil, B. and Skavara, M., *Fabricate 2020. Making Resilient Architecture*, UCL Press, London, pp. 140-147, 2020, <https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsvw.22>.

«3D Printed House by Apis Cor Entirely Created in One Day», *Arch20*, <https://www.arch20.com/3d-printed-house-apis-cor/#!>

«3D Housing 05 – Il futuro democratico dell’abitazione», *Domusweb*, 16 aprile 2018, <https://www.domusweb.it/it/eventi/salone-del-mobile/2018/3d-housing-05---il-futuro-democratico-dellabitazione.html>.

«Beyond the Geometry Plastic 3D Printed Pavilion / Archi-Union Architects + Fab-Union», *ArchDaily*, 2021, <https://www.archdaily.com/960939/beyond-the-geometry-the-worlds-largest-modified-plastic-3d-printing-architecture-archi-union-architects>.

«Office of the Future», *The Journal of The American Institute of Architects*, 2016, https://www.architectmagazine.com/project-gallery/office-of-the-future_o. Sito web di 3D housing 05: <https://www.3dhousing05.com/>.

«3D-printed concrete bridge unveiled in north China», *Xinhuanet*, 15 ottobre 2019, http://www.xinhuanet.com/english/2019-10/15/c_138474114.htm.

Sito web di 3D Printing Industry: <https://3dprintingindustry.com/news/worlds-longest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-unveiled-in-nijmegen-195951>.

Sito web di Archi Solutions Workshop: <https://www.archi-solutions.com/2017-2arachne/>.

Sito web del Block Research Group:
<https://block.arch.ethz.ch/brg/project/phoenix-3d-concrete-printed-masonry-bridge-lyon-france-2023>.

Sito web di Clouds Architecture Office: <https://cloudsao.com>.

Sito web della Contour Crafting Corporation: <https://www.contourcrafting.com/>

Sito web di D-Shape:
<https://d-shape.com/Prodotti/unacasatuttadiunpezzo/>.

Sito web di Dar: <https://www.dar.com/insights/details/autodesk-university-2022-spotlights-dar%E2%80%99s-new-5-m-smart-bridge->

Sito web di DART Lab <https://dartlab.umich.edu/research-project/cavity-shell-sequential-cast-in-place-method-with-ultra-thin-additively-manufactured-formwork-for-compression-only-structures/>.

Sito web di Digital Building Technologies dell'ETH di Zurigo <https://dbt.arch.ethz.ch/project/>

Sito web di Foster + Partners: <https://www.fosterandpartners.com/projects>

Sito web di Gramazio Kohler Research: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/projekte/index.html>.

Sito web di ICON: <https://www.iconbuild.com>

Sito web di IMD Raadgevende Ingenieurs: <https://imdbv.nl/nieuws/met-gerecyclede-pet-flessen-geprint-paviljoen-geopend>.

Sito web di Lake | Flato: <https://www.lakeflato.com>

Sito web di Mario Cucinella Architects: <https://www.mcarchitects.it/progetti/tecla-technology-and-clay>.

Sito web di Mars Ice House: <https://www.marsicehouse.com/>.

Sito web di Michael Hansmeyer: <https://www.michael-hansmeyer.com/digital-grotesque-I>.

Sito web della News Agency – Wam degli Emirati Arabi: <https://wam.ae/en/details/1395294773443>.

Sito web di SHoP: <https://www.shoparc.com/projects/design-miami/>.

Sito web di SEArch+: <https://www.spacexarch.com/>.

Sito web di Stampa 3D forum: <https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/differenze-stampanti-3d-cartesiane-delta-polari/>

Sito web di Studio RAP: <https://studiorap.nl/>.

Sito web di Tethon 3D, https://tethon3d.com/case_studies/cool-brick-designed-by-emerging-objects/

Capitolo 5

Azambuja Varela, P., Sousa, P. D., *Reinforced, Reusable, Reconfigurable Molds for Cast Voussoirs*, in Kepczynska-Walczak, A., Bialkowski, S. (a cura di.), *Computing for a Better Tomorrow - Proceedings of the 36th eCAADe Conference* (Lodz, Polonia, 19-21 settembre 2018), vol. 1, 2018, pp. 771-780.

Azambuja Varela, P., Sousa, P. D., *Liquid Stereotomy - the Tamandua Vault*, in Werner, L., Koering, D. (a cura di.), *Anthropologic: Architecture and Fabrication in the cognitive age - Proceedings of the 38th eCAADe Conference* (Berlino, Germania, 16-18 settembre 2020), vol. 2, 2020, pp. 361-370.

Battaglia, C., Miller M., Verian, K., *DE:Stress Pavilion. Print-Cast Concrete for the Fabrication of Thin Shell Architecture*, in Yablonina, M., Marcus, A., Doyle, S., del Campo, M., Ago, V., Slocum, B., *ACADIA 2020: Distributed Proximities, vol. II: Projects*, Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) (Online, 24-30 Ottobre 2020), 2020, pp. 203-207.

Bhooshan, S., Bhooshan, V., Dell'Endice, A., Chu, J., Singer, P., Megens, J., Van Mele, T., Block, P., *The Striatum bridge. Computational design and robotic fabrication of an unreinforced, 3D-concrete-printed, masonry arch bridge*, in *Architecture, Structure and Construction*, vol. 2, 2022, pp. 521-543.

Xu, F., VULCAN: Closing the Loop in 3D-Printed Architectural Design, in *Architectural Design*, vol. 86, Issue 5, 2016, pp. 82-91.

Zivkovic, S., Battaglia, C., *Rough Pass Extrusion Tooling. CNC Post-processing of 3D-Printed Sub-additive Concrete Lattice Structures*, in *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* (Mexico City, Messico 18-20 ottobre 2018), 2018, pp. 302-311

Hexastone. Revolutionising Construction: 3D Concrete Printing as a revival for Structural Efficiency, sito web di Vertico, <https://www.vertico.xyz/hexastone>.

Capitolo 6

Bernardini, P., *Brevi note sul metodo scientifico*, in *Ithaca Educational*, n. 1, 2019, pp. 7-14.

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

Capitolo 7

Carvalho, J., Cruz, P., Figueiredo, B., *3D Printed Ceramic Vault Shading Systems*, in *Proceedings of the IASS Symposium 2018* (Boston, USA, 16-20 luglio 2018), International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2018.

Carvalho, J., Figueiredo, B., Cruz, P., *Free-form Ceramic Vault System. Taking ceramic additive manufacturing to real scale*, in Sousa, J. P., Xavier, J.P., Castro Henriques, G. (a cura di), *Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution - Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference University of Porto* (Porto, Portugal, 11-13 settembre 2019), vol. 1, 2019, pp. 485-492.

Cruz, P., Figueiredo, B., Carvalho, J., Campos, T., *Additive Manufacturing of Ceramic Components for Façade Construction*, in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 8, n. 1, issue 20, 2020.

Fallacara, G., *Architectural Stone Elements. Research, Design and Fabrication*, Parigi, Presses des Ponts et Chaussées, 2016.

Gohnert, M., Bradley, R., *Catenary solutions for arches and vaults*, in *Journal of Architectural Engineering*, n. 26 (2), 2020.

Gohnert, M., Bulovic, I., Bradley, R., *A low-cost housing solution: earth block catenary vaults*, in *Structures*, vol. 15, 2018, pp. 270-278.

Portoghesi, P., *Borromini. Vita e Opere*, Milano, Skira, 2019.

Scuro, C., Tiberti, S., Codispoti, R., Milani, G., Olivito, R. S., *Fictile tubules: A traditional Mediterranean construction technique for masonry vaulted systems*, in *Construction and Building Materials*, n. 193, 2018, 84-96.

Tiberti, S., Scuro, C., Codispoti, R., Olivito, R. S., Milani, G., *Traditional Masonry Arches and Domes With Fictile Tubules in Mediterranean Seismic Areas: Advanced Numerical Models and Experimentation*, in *Proceedings of 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* (Rodi, Grecia, 15-17 giugno 2017), vol. 1, 2017, pp. 2431-244.

Capitolo 8

Airaldi, G., *Il ponte di Istanbul: un progetto incompiuto di Leonardo da Vinci*, Bologna, Marietti 1820, 2020.