



Politecnico
di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Biomorfismo computazionale e fabbricazione digitale. Formalizzazione di processi morfogenetici impliciti e co-evoluzione tra forma e produzione

This is a PhD Thesis

Original Citation:

Biomorfismo computazionale e fabbricazione digitale. Formalizzazione di processi morfogenetici impliciti e co-evoluzione tra forma e produzione / Fieni, F.. - ELETTRONICO. - (2026).

Availability:

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/305200> since: 2026-07-15

Published version

DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

Terms of use:

(Article begins on next page)

BIOMORFISMO COMPUTAZIONALE E FABBRICAZIONE DIGITALE

Formalizzazione di processi morfogenetici impliciti
e co-evoluzione tra forma e produzione

Francesco Fieni



**Ministero
dell'Università
e della Ricerca**



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



**Politecnico
di Bari**

*La borsa di dottorato è stata finanziata
dall'Unione Europea - Next Generation EU, Missione 4 Componente 1 CUP D93D22001350001.*

POLITECNICO DI BARI

Dipartimento di Architettura, Costruzione e Design ArCoD

Dottorato di Ricerca in

PROGETTO PER IL PATRIMONIO: CONOSCENZA, TRADIZIONE E INNOVAZIONE

XXXVIII ciclo

ELABORATO FINALE DI DOTTORATO

BIOMORFISMO COMPUTAZIONALE E

FABBRICAZIONE DIGITALE

Formalizzazione di processi morfogenetici impliciti

e co-evoluzione tra forma e produzione

Settore Scientifico-Disciplinare

ICAR/13 – Disegno Industriale

Curriculum

Computational Design e Digital Fabrication

Dottorando

Francesco Fieni

Tutor / Relatore

Prof. Arch. Nicola Parisi

Anno Accademico 2025/2026

Abstract &

C.0 Indice



Capitolo Zero

Soglia e struttura
della ricerca

ABSTRACT

La ricerca si colloca nell'ambito del design computazionale e della fabbricazione digitale e propone la formalizzazione e dimostrazione di un modello teorico relazionale tra sistema generativo e sistema produttivo. La tesi riconduce le famiglie di modelli morfogenetici **considerate** a funzioni implicite parametriche: continue nel caso delle superfici minime periodiche e ricorsive nel caso delle strutture frattali. Su questa base, costruisce un “**Core algoritmico**” stabile, implementato attraverso la valutazione della funzione su una griglia volumetrica discreta, la generazione di un campo scalare tridimensionale e l'estrazione dell'iso-superficie di livello mediante discretizzazione poligonale.

Su questa base viene formalizzato un framework metodologico iterativo in cui **Algoritmo**, **Variazione parametrica** e **Verifica di producibilità** costituiscono un sistema di retroazione dinamica. In tale configurazione metodologica, la produzione non rappresenta una fase esecutiva successiva alla generazione formale, ma una componente attiva che ridefinisce continuamente le condizioni operative della morfologia. La materia e i vincoli tecnologici introducono una frizione reale che rende possibile una dinamica di co-evoluzione tra forma algoritmica e processo produttivo.

Attraverso una sequenza strutturata di casi studio articolati su differenti famiglie morfogenetiche, scale dimensionali eterogenee e regimi di fabbricazione progressivamente più complessi, la ricerca dimostra che l'espansione della complessità morfogenetica trattabile non dipende dalla modifica del core algoritmico, ma dalla riorganizzazione del sistema produttivo e dall'interazione parametrica tra formalizzazione e produzione.

La tesi non si configura, quindi, come una collezione di sperimentazioni formali indipendenti, bensì come una struttura unitaria in cui ciascun prototipo agisce come dispositivo di verifica di un modello teorico coerente. Il contributo consiste nella dimostrazione di un framework metodologico che integra **Formalizzazione**, **Produzione** e **Co-Evoluzione**, connettendo generazione algoritmica e materializzazione fisica in un processo dinamico e trasferibile.

Keywords

Design computazionale

Morfogenesi

Framework metodologico

Sistema generativo

Produzione digitale

Indice

ABSTRACT	3
Indice	4
CAPITOLO 1 – Introduzione	9
1.1 Contesto disciplinare: design computazionale e fabbricazione digitale	10
1.2 Evoluzione parallela di morfogenesi computazionale e sistemi produttivi	11
1.3 Discontinuità strutturale e formulazione del problema	12
1.4 Ipotesi di ricerca	13
1.5 Obiettivi e domande di ricerca	13
1.6 Impostazione metodologica	14
CAPITOLO 2 – Stato dell’arte	17
2.1 Formalizzazione computazionale del biomorfismo	18
2.2 Regimi di fabbricazione digitale	19
2.3 Materialità e interazione forma–processo	20
2.4 Sintesi critica e identificazione del gap	21
2.5 Raccordo tecnico tra stato dell’arte e processi adottati	22
CAPITOLO 3 – Formalizzazione del biomorfismo computazionale	27
3.1 Definizione operativa di biomorfismo computazionale	28
3.2 Modelli morfogenetici come funzioni implicite parametriche	29
3.3 Formalizzazione matematica delle superfici minime periodiche (TPMS)	31
3.4 Formalizzazione matematica delle strutture frattali come sistemi iterativi ricorsivi	33
3.5 Architettura implementativa del core morfogenetico: funzione → campo scalare volumetrico → estrazione di superficie di livello	35

3.5.1 Funzione generativa	36
3.5.2 Discretizzazione del dominio e costruzione del campo scalare	36
3.5.3 Definizione del valore iso ed estrazione della superficie	37
3.5.4 Articolazione interna del campo e controllo della morfologia	38
3.5.5 Neutralità della pipeline rispetto alle famiglie morfogenetiche	39
3.5.6 Implicazione strutturale	40
3.6 Parametrizzazione numerica e controllo dello spazio delle varianti	40
3.7 Invarianza strutturale dell’algoritmo rispetto alla variazione dei parametri	41
3.8 Condizioni di robustezza e trasferibilità del core morfogenetico	42
CAPITOLO 4 – Framework metodologico integrato	45
4.1 Dalla formalizzazione algoritmica alla traducibilità materiale	46
4.2 Definizione del loop metodologico Algoritmo → Variazione → Producibilità	48
4.3 Variazione parametrica come primo livello di adattamento	50
4.4 Filtro geometrico-produttivo e natura dei vincoli tecnologici	52
4.5 Condizione di non-producibilità e iterazione decisionale	54
4.6 Passaggio di regime produttivo come strategia strutturale	56
4.7 Gerarchia dei regimi di fabbricazione	57
4.8 Progressione della complessità morfogenetica trattabile	58
4.9 Struttura generale della pipeline operativa	59
CAPITOLO 5 – Validazione progressiva del framework	63
5.1 Applicazione del core algoritmico alle TPMS: generazione dei moduli	64
5.1.1 Le TPMS come prima classe di applicazione del core	64
5.1.2 Formulazione implicita del giroide e contenuto morfogenetico del caso	65
5.1.3 Traduzione della funzione nel sistema implementativo di Geometry Nodes	65
5.1.4 Parametrizzazione della famiglia dei moduli TPMS	67

5.2 Moduli TPMS in fabbricazione additiva	70
5.2.1 Impostazione del caso studio additivo e selezione dei moduli da verificare	70
5.2.2 Validazione di stampabilità tramite voxelizzazione e simulazione FEM	71
5.2.3 Criteri di esito e classificazione degli errori	73
5.2.4 Pipeline produttiva reale: slicing, materiale e parametri di stampa	75
5.2.5 Prototipazione, confronto simulazione-stampa e chiusura del caso	77
5.3 Modulo TPMS in fabbricazione sottrattiva su scala architettonica	79
5.3.1 Impostazione del caso studio sottrattivo e selezione del modulo in scala architettonica	79
5.3.2 Validazione geometrico-produttiva della mesh e controllo del sottosquadro	81
5.3.3 Segmentazione del volume, slicing e formalizzazione del processo CAM	83
5.3.4 CAM, simulazione robotica offline e definizione della lavorazione a doppia faccia	85
5.3.5 Fabbricazione, assemblaggio, scansione 3D e confronto digital mockup-prototipo	88
5.4 Applicazione del core algoritmico ai frattali	95
5.4.1 Inquadramento della famiglia frattale e continuità metodologica con il core	95
5.4.2 Formalizzazione operativa dei frattali come sistemi iterativi ricorsivi	96
5.4.3 Parametrizzazione numerica e costruzione dello spazio delle varianti frattali	100
5.4.4 Selezione del Mandelbulb come caso guida per la validazione produttiva	101
5.5 Capitello frattale in fabbricazione indiretta tramite cassaforma	103
5.5.1 Impostazione del caso studio indiretto e motivazione	

del cambio di regime produttivo	103
5.5.2 Traduzione del mockup digitale in cassaforma negativa in PVA	105
5.5.3 Parametri di slicing, stampa del PVA e preparazione della cassaforma	106
5.5.4 Colata del materiale, maturazione e dissoluzione della cassaforma	109
5.5.5 Verifica del prototipo finale e confronto con il digital mockup	111
5.6 Analisi comparativa e sintesi della validazione	116
5.7 Verifica incorporata e convergenza del processo di validazione	119
CAPITOLO 6 – Discussione	121
6.1 Sintesi critica dei risultati alla luce del modello proposto	122
6.2 Formalizzazione del contributo: produzione come parte del sistema generativo	123
6.3 Co-evoluzione forma-materia mediata dal processo produttivo	125
6.4 Differenza rispetto a modelli puramente generativi o puramente ottimizzativi	127
6.5 Limiti e condizioni di validità del framework	129
6.6 Implicazioni disciplinari per il design computazionale	131
6.7 Originalità metodologica e condizioni di generalizzazione	132
CAPITOLO 7 – Conclusioni	135
7.1 Ricomposizione del percorso dimostrativo	136
7.2 Astrazione del core morfogenetico come classe di sistemi impliciti parametrici	137
7.3 Dimostrazione della co-evoluzione multi-regime	138
7.4 Generalizzazione ed estensioni future del modello morfogenetico implicito parametrico	139
7.5 Linee operative per una validazione estesa	141
Bibliografia	143

C.1 Introduzione

Capitolo Primo

Contesto, problema e ipotesi della ricerca

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

Il Capitolo 1 introduce la ricerca nel contesto del Design Computazionale e della Fabbricazione Digitale contemporanea, evidenziando la crescente complessità dei modelli morfogenetici e l'evoluzione dei regimi produttivi digitali. Nonostante tali sviluppi paralleli, permane una discontinuità strutturale nella costruzione metodologica della loro relazione. La ricerca si articola attorno a una triade concettuale composta da Formalizzazione, Produzione e Co-evoluzione.

La formalizzazione è qui intesa come esplicitazione delle regole generative, parametriche e computazionali del sistema morfogenetico, fino alla sua definizione come struttura algoritmica esplicita; la produzione introduce i regimi materiali e tecnologici come sistemi di vincolo e possibilità; la co-evoluzione descrive la dinamica relazionale che emerge dalla loro integrazione. Tale triade costituisce l'ossatura teorica dell'intera tesi.

A partire dalla discontinuità tra la crescente complessità dei modelli morfogenetici e l'evoluzione dei regimi di produzione digitale, il capitolo definisce il problema di ricerca e introduce l'ipotesi centrale della tesi: rendere esplicito il core morfogenetico può consentire di integrare i vincoli e le possibilità della produzione digitale direttamente nel processo generativo, trasformando la progettazione in un sistema di co-evoluzione tra forma e produzione. Il capitolo presenta inoltre gli obiettivi, le domande di ricerca, l'impostazione metodologica e la struttura complessiva della tesi.

Keywords

Contesto disciplinare

Ipotesi di ricerca

Obiettivi

Metodo

Struttura della tesi

Theory and design in the first digital age

Rika Oxman, Faculty of Architecture and Town Planning Technion, Haifa 32000, Israel

Digital design and its growing impact on design and production practices have resulted in the need for a re-examination of current design theories and methodologies in order to explain and guide future research and development. The present research postulates the requirements for a conceptual framework and theoretical basis of digital design; reviews the recent theoretical and historical background; and defines a generic scheme of design characteristics through which the paradigmatic classes of digital design are formulated. The implication of this research for the formulation of 'digital design thinking' is presented and discussed.

Keywords: digital design, design theory, design methodology, design thinking

The evolution of digital design as a unique field of design endeavor, motivated by its own body of theoretical sources, promulgated by a culture of discourse, supported by new technologies, and producing unique classes of designs is a phenomenon that has been rapidly crystallizing in the past decade. Among the significance of digital design for the design theoretical community is the way that this form of highly mediated design is beginning to evolve unique design methodologies, unique forms of design interaction and unique formal content. Due to the large body of diverse publications that has accompanied these developments the problem of encompassing the intellectual domain of digital design culture is, in itself, a difficult mandate. Beyond this problem of diversity, there are other, more theoretical, challenges to our interpretation and understanding of digital design.

A high level of publication on the subject has been buoyed by the intensity of interest of the design professions in the new design possibilities as represented by dramatic form-generative potential. In architecture, product design and other design fields, this intrinsic innovation, quickly recognized by younger experimental design practices, has been a driving force.

Oxman, 2006

Theory and Design in the First Digital Age

Design Studies, 27(3)

1.1 Contesto disciplinare: design computazionale e fabbricazione digitale

La presente ricerca si colloca nello spazio disciplinare di intersezione tra design computazionale e fabbricazione digitale, intesi come domini reciprocamente implicati nella definizione contemporanea del progetto. In questo quadro il design computazionale, che spesso è inteso come il solo impiego di strumenti digitali nella progettazione, è recepito, invece, come un ambiente teorico-operativo in cui la forma viene esplicitata come sistema di relazioni, parametri, vincoli e procedure generative ¹. La letteratura ha chiarito che i modelli digitali hanno progressivamente trasformato il progetto da pratica centrata sulla rappresentazione dell'oggetto a pratica centrata sulla codificazione dei processi che ne governano la variazione ¹; nello stesso tempo, il lessico disciplinare più recente distingue con maggiore precisione tra **Parametric**, **Generative** e **Algorithmic Design**, mostrando che non si tratta di sinonimi ma di differenti modalità di costruzione e controllo della forma ^{2,3}.

Assunto in questi termini, il design computazionale opera, dunque, come ambiente di formalizzazione della morfologia. Ciò che viene progettato non è soltanto una configurazione geometrica, ma la struttura che la rende manipolabile, iterabile e differenziabile entro uno spazio di varianti controllate ^{2,3}. È precisamente questo passaggio — dalla forma come esito alla forma come sistema esplicito — a rendere possibile, per la presente tesi, un trattamento non analogico del biomorfismo e a collocare la ricerca sul versante dei modelli generativi formalizzati, piuttosto che su quello delle semplici evocazioni figurative della natura ¹.

Parallelamente, la fabbricazione digitale non può essere ridotta a fase terminale di esecuzione. Dal paradigma CAD/CAM ai più recenti ambienti di “digital fabrication”, la letteratura descrive un progressivo ripensamento del rapporto tra progetto e produzione, nel quale il modello digitale diventa interfaccia attiva tra descrizione geometrica, generazione di istruzioni operative, controllo della lavorazione e costruzione materiale ⁴. In tale prospettiva, additive manufacturing, lavorazioni sottrattive CNC, fabbricazione robotica e prototipazione avanzata definiscono regimi produttivi computazionalmente mediati, ciascuno con proprie logiche di traducibilità, tolleranza, sequenza e controllo⁴.

Da un lato, il design computazionale rende trattabile una complessità morfologica crescente attraverso modelli relazionali e generativi ^{1,3}; dall'altro, la fabbricazione digitale ridefinisce le condizioni attraverso cui tale complessità può essere trasferita nella materia ⁴. La convergenza è dunque reale, e la letteratura più avanzata parla esplicitamente di una integrazione crescente tra computation, ma-

terialisation e proprietà materiali ⁵. Tuttavia, nel quadro qui assunto, tale convergenza va letta come una condizione ancora non del tutto stabilizzata in un modello teorico unitario: più come campo avanzato di integrazione che come sintesi già pienamente esplicitata ^{4,5}.

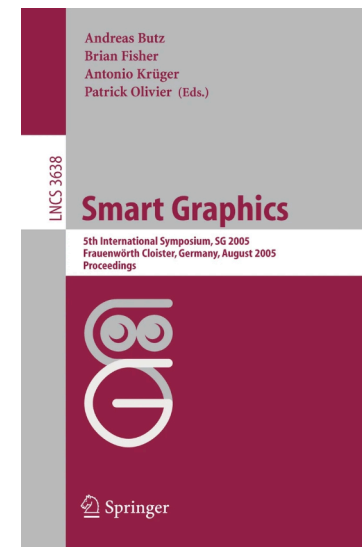
1.2 Evoluzione parallela di morfogenesi computazionale e sistemi produttivi

Nel campo del design computazionale, l'evoluzione degli ultimi decenni ha progressivamente spostato il baricentro del progetto dalla definizione di oggetti discreti alla costruzione di sistemi capaci di organizzare relazioni, dipendenze e variazioni. In questa traiettoria, la modellazione parametrica ha reso esplicita la struttura relazionale della forma, mentre generative e algorithmic design hanno esteso il progetto verso processi nei quali la morfologia emerge come esito di regole, procedure e trasformazioni iterabili più che come configurazione fissata una volta per tutte ¹⁻³.

Su questa base, anche la morfogenesi computazionale ha ampliato il campo operativo del progetto. La letteratura sul digital design ha mostrato che i modelli computazionali non solo permettono di rappresentare forme complesse, ma consentono anche di codificare logiche di generazione; parallelamente, le ricerche sul computational design in architettura hanno chiarito che la crescente precisione terminologica tra parametric, generative e algorithmic design corrisponde a un reale ampliamento delle modalità con cui la forma può essere costruita, differenziata e controllata ^{1,3}.

Concomitantemente, anche il dominio produttivo ha conosciuto una trasformazione profonda: dal sistema CAD/CAM, centrato sulla traducibilità del modello digitale in istruzioni operative, si è passati a un ecosistema di fabbricazione digitale molto più articolato, nel quale manifattura additiva, lavorazioni sottrattive CNC, fabbricazione robotica e prototipazione avanzata ridefiniscono il rapporto tra informazione geometrica, processo costruttivo e materializzazione. La letteratura su design e fabbricazione nell'era digitale insiste proprio su questa continuità crescente tra modellazione e produzione, mentre ricerche più recenti mostrano come i workflow contemporanei integrino ormai concept design, modellazione parametrica, simulazione di stampabilità e prototipazione entro sequenze operative sempre più connesse ^{4,6}.

Il punto decisivo, tuttavia, è che questa doppia evoluzione non si è sviluppata secondo una crescita pienamente simmetrica. La capacità di generare complessità morfologica è cresciuta molto rapidamente sul piano della formalizzazione e del controllo computazionale, mentre la sua traducibilità produttiva ha richiesto l'introduzio-



Aish & Woodbury, 2005

Multi-Level Interaction in Parametric Design

Smart Graphics, Vol. 3638



Caetano et al.
2020

Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design

Frontiers of Architectural Research, 9(2)

ne di mediazioni ulteriori — simulazione, slicing, CAM, verifica di stampabilità, controllo di collisione, definizione dei percorsi utensili — che segnalano come il passaggio dalla generazione alla materializzazione non sia automaticamente garantito dal solo modello formale ^{4,6}.

1.3 Discontinuità strutturale e formulazione del problema

Nei modelli parametrici, algoritmici e morfogenetici, la forma viene costruita come sistema di relazioni, regole e trasformazioni; tuttavia, proprio questa potenza generativa tende spesso a operare entro un dominio primariamente geometrico-computazionale, nel quale la variabilità è governata dalla coerenza interna del modello più che dalle condizioni materiali e operative della sua realizzazione. Ne deriva che la validità del sistema generativo non implica, di per sé, la traducibilità della forma in processo costruttivo: non ogni configurazione formalmente ammissibile è anche materialmente eseguibile, e non ogni variante geometricamente consistente è compatibile con un determinato regime produttivo ¹⁻³.

Simmetricamente, anche una lettura della fabbricazione come momento meramente esecutivo risulta insufficiente. Quando la produzione viene assunta come fase terminale deputata a tradurre una geometria già definita in istruzioni macchina, i vincoli di utensile, accessibilità, orientamento, sequenza, tolleranza, comportamento del materiale e stabilità del processo intervengono soltanto a valle, come correzioni o riduzioni di una libertà formale già esercitata altrove. Ma la letteratura sulla fabbricazione digitale e sul “design-through-making” ha mostrato che la produzione ridefinisce la geometria praticabile, riconfigura le soglie di complessità affrontabili e introduce criteri di selezione che appartengono strutturalmente al progetto stesso. Per questa ragione, considerare la fabbricazione come mera esecuzione significa oscurarne il ruolo epistemico, oltre che operativo, nella determinazione della forma ^{4,6,7}.

La discontinuità strutturale che la tesi intende affrontare emerge precisamente nello scarto tra lo spazio delle varianti generabili dal modello e lo spazio delle configurazioni che un dato regime produttivo consente di materializzare senza perdita di coerenza geometrica, prestazionale o costruttiva. Le pratiche più avanzate di fabbricazione digitale mostrano, infatti, che tra generazione e realizzazione si rendono necessari passaggi di simulazione, verifica e adattamento, segno che la relazione tra forma e processo non è ancora garantita da un modello teorico unitario. Il problema, dunque, consiste nell'esplicitare una relazione tra sistema morfogenetico e sistema

produttivo, tale da descrivere come la producibilità intervenga nella definizione stessa della morfologia ^{5,8,6}.

1.4 Ipotesi di ricerca

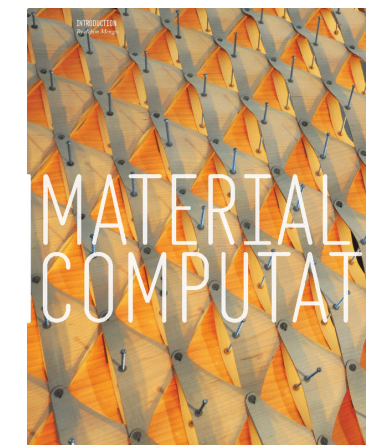
Su questa base, la tesi formula l'ipotesi che la relazione tra sistema morfogenetico e regime produttivo possa essere espressa come un sistema iterativo di co-determinazione. In tale sistema, la producibilità interviene come variabile interna che seleziona, restringe e riorganizza lo spazio delle configurazioni possibili. La produzione entra così nel progetto come parte attiva del dispositivo che rende la morfologia operativamente sviluppabile ^{1,4,5}.

L'ipotesi assume, più precisamente, che un modello morfogenetico computazionale possa mantenere continuità logica e trasferibilità operativa solo se viene messo in relazione esplicita con i regimi produttivi che ne condizionano la traduzione materiale. Ciò implica che parametri geometrici, comportamento del materiale, logiche di toolpath, accessibilità utensile, sequenze di lavorazione, errori di processo e soglie di stabilità vengano trattati come variabili operative che partecipano alla definizione della morfologia producibile ^{2,7,6}. In questa prospettiva, la forma emerge entro una dinamica di co-determinazione nella quale formalizzazione algoritmica e sistema produttivo si ridefiniscono reciprocamente ^{5,8}.

La conseguenza teorica di tale ipotesi è decisiva: l'espansione della complessità morfogenetica trattabile potrebbe dipendere primariamente dalla possibilità di costruire un framework in cui algoritmo, variazione parametrica e verifica di producibilità agiscano come sistema iterativo. In altri termini, la ricerca assume che un core morfogenetico sufficientemente esplicito e stabile possa mantenere la propria invarianza strutturale anche al variare delle condizioni di materializzazione, purché il rapporto con la produzione venga formalizzato come relazione dinamica e non come semplice fase applicativa ^{1,5,6}.

1.5 Obiettivi e domande di ricerca

A partire dall'ipotesi formulata nel paragrafo precedente, l'obiettivo generale della tesi è quello di codificare un modello relazionale tra sistema generativo e sistema produttivo, capace di descrivere la morfologia come configurazione che emerge dall'interazione tra formalizzazione algoritmica e condizioni di materializzazione. Il primo obiettivo, di carattere teorico, consiste dunque nel rendere esplicita questa relazione entro un quadro concettuale unitario, assumendo che la forma computazionale debba essere letta come costruzione processuale e non come oggetto già compiuto ^{1,5}.



Menges, 2012

Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design

Architectural Design, 2012



Kolarevic, 2004

Architecture in the Digital Age:
Design and Manufacturing

Taylor & Francis

Il secondo obiettivo, di carattere metodologico, consiste nella costruzione di un framework iterativo capace di mettere in relazione variazione parametrica e verifica di producibilità entro una struttura operativa generalizzabile. L'intento non è, quindi, rendere esplicito il modo in cui vincoli geometrici, materiali e tecnologici intervengano nella selezione delle configurazioni realizzabili. In questo senso, la tesi assume come obiettivo metodologico una logica relazionale in cui la produzione retroagisca sul progetto in modo codificato, esplicito e strutturato ^{4,6}.

Il terzo obiettivo è sperimentale e dimostrativo: verificare la tenuta del framework attraverso casi studio progressivi, articolati su varie famiglie morfogenetiche a scale diverse e diversi regimi di fabbricazione. La ricerca intende dimostrarne l'operatività della formulazione teorica mediante una sequenza di validazioni nelle quali la producibilità funzioni come criterio attivo di riorganizzazione del processo. La scelta di una validazione multi-regime risponde precisamente alla necessità di mostrare che l'aumento della complessità morfogenetica trattabile può dipendere dalla ridefinizione del rapporto tra core algoritmico e sistema produttivo, secondo una logica già riconoscibile in workflow che integrano design, modellazione parametrica e prototipazione, ma qui assunta come oggetto esplicito di dimostrazione ^{5,6}.

Da tali obiettivi discendono tre domande di ricerca tra loro concatenate. La prima domanda è teorica: in che modo può essere resa esplicita la relazione tra sistema morfogenetico e sistema produttivo affinché la produzione non sia un'aggiunta esterna, ma una componente interna alla definizione della forma? La seconda è metodologica: attraverso quale struttura iterativa è possibile far retroagire la verifica di producibilità sulla variazione parametrica senza dissolvere l'invarianza del core generativo? La terza è sperimentale: entro quali condizioni il medesimo impianto morfogenetico può essere trasferito tra regimi produttivi differenti mantenendo continuità logica e capacità di materializzazione?

1.6 Impostazione metodologica

La metodologia della ricerca è costruita come una sequenza dimostrativa articolata in tre livelli: formalizzazione del sistema morfogenetico, implementazione computazionale del core algoritmico e verifica entro condizioni reali di producibilità. Il metodo coincide quindi con una procedura che mette in relazione costruzione teorica, controllo operativo e validazione materiale entro un medesimo impianto di ricerca. In questo senso, la tesi si colloca nel solco di quelle linee di ricerca che hanno progressivamente sostituito alla successione lineare tra rappresentazione, modellazione e produzio-

ne una logica integrata, nella quale il modello digitale opera come ambiente di definizione, verifica e coordinamento del processo progettuale e costruttivo ^{1,2,4}.

Il primo livello del metodo è teorico-formale e riguarda l'esplicitazione del sistema morfogenetico come struttura algoritmica descrivibile in termini rigorosi. Da qui deriva la scelta di operare su modelli formulabili come funzioni implicite parametriche, così da trattare la morfologia come costruzione computazionale controllabile e non come semplice repertorio analogico o figurativo. L'implementazione serve quindi a verificare la stabilità del core generativo al variare dei parametri e delle condizioni applicative, rendendo osservabile la continuità logica tra formalizzazione e produzione di varianti ^{1,2}.

Il secondo livello è metodologico-operativo e riguarda la costruzione di una logica iterativa tra variazione parametrica e verifica di producibilità. La ricerca assume quindi che ogni configurazione debba essere valutata rispetto ai vincoli introdotti dal regime produttivo e che l'esito di tale verifica possa richiedere una ricalibrazione dei parametri o, nei casi di non-producibilità, una riorganizzazione più ampia del processo. In questo quadro, simulazione, controllo geometrico-produttivo e prototipazione costituiscono dispositivi metodici attraverso cui la fabbricabilità retroagisce sulla definizione della forma. Proprio i workflow più avanzati di fabbricazione digitale mostrano che la traduzione materiale di geometrie complesse richiede catene intermedie di verifica e adattamento, e che tali passaggi non sono secondari rispetto al progetto ma interni alla sua articolazione operativa ^{4,6}.

Il terzo livello è sperimentale e dimostrativo. La tesi assume che un'ipotesi di co-determinazione tra sistema generativo e sistema produttivo non possa essere sostenuta soltanto sul piano concettuale, ma debba essere sottoposta a verifica mediante casi studio progressivi, differenziati per famiglia morfogenetica, scala e regime di fabbricazione. La validazione, oltre alla semplice dimostrazione illustrativa di esiti formali riusciti, si focalizza su una procedura comparativa capace di mostrare entro quali condizioni un medesimo impianto morfogenetico possa attraversare domini produttivi differenti mantenendo continuità logica e capacità di adattamento.

La metodologia della tesi si definisce quindi come teorica, computazionale e sperimentale: teorica perché formalizza un modello relazionale, computazionale perché ne implementa il funzionamento, sperimentale perché ne verifica la tenuta entro una validazione multi-regime ^{4,6}.

The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries

Valentino Sangiorgio ^{1,2,3,4,5,*}, Fabio Pasetti ^{1,5}, Francesco Fassi ⁶ and Nicola Pasetti ^{4,5}

¹ IUTRIS—Institute of Technology and Design, University of Piemonte Orientale, 10129 Alessandria, Italy; ² IUTRIS—Department of Civil, Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry, Politecnico University of Bari, 70125 Bari, Italy; ³ IUTRIS—Department of Civil, Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry, Politecnico University of Bari, 70125 Bari, Italy; ⁴ IUTRIS—Department of Civil, Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry, Politecnico University of Bari, 70125 Bari, Italy; ⁵ IUTRIS—Department of Civil, Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry, Politecnico University of Bari, 70125 Bari, Italy; ⁶ IUTRIS—Department of Civil, Environmental, Land, Building Engineering and Chemistry, Politecnico University of Bari, 70125 Bari, Italy; * Correspondence: valentino.sangiorgio@polito.it

Abstract: The building construction sector is undergoing one of the most profound transformations towards the digital transition of production. In recent decades, the advent of novel technologies for the 3D printing of clay opened up new sustainable possibilities in construction. Some architectural applications of 3D printed clay bricks with simple internal configurations are being developed around the world. On the other hand, the full potential of 3D printed bricks for building production is still unknown. Scientific studies about the design and printability of 3D printed bricks exploring complex internal geometries are completely missing in the related literature. This paper explores the new boundaries of 3D printed clay bricks realized with a sustainable extrusion-based 3D clay printing process by proposing a novel conception, design, and analysis. In particular, the proposed methodological approach includes: (i) conception and design; (ii) geometric modeling; (iii) simulation of printability and (iv) prototyping. The new design and conception aim to fully exploit the potential of 3D printing to realize complex internal geometry in a 3D printed brick. To this aim, the research investigates the possibility of internal configurations generated by using geometries with well-known manufacturable mechanical properties, such as periodic minimal surfaces. In conclusion, the results are validated by a wide prototyping campaign.

Keywords: clay 3D printing; sustainable construction; clay bricks bricks design; building envelope; additive manufacturing; printability simulation; periodic minimal surfaces

1. Introduction

The 21st century represents the beginning of the digital transition in the building production sector. Among the enabling technologies of the fourth industrial revolution, additive manufacturing is one of the most promising tools to renovate the construction process with a sustainable perspective [1,2]. Nowadays, 3D printing can be considered a consolidated technology and several 3D printed buildings are being developed worldwide [3,4]. Most of the current applications and companies' interests are focused on full 3D printed buildings. On the other hand, recent researchers demonstrate the potential of this technology applied for small components fabrication [5,6].

In the last decade, the area of 3D printing production has grown with the advent of a new sustainable technology for 3D printing of clay. The applications of this technique in the construction sector have attracted interest of both companies and the academic world.

Sustainability 2022, 14, 506. <https://doi.org/10.3390/su14030506>

<https://www.mdpi.com/journal/sustainability>

Sangiorgio

et al. 2012

The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design

Sustainability 14(2)

C·2 Stato dell'arte

Capitolo Secondo

Dai sistemi naturali alle
logiche morfogenetiche

Sinossi del capitolo

C·2

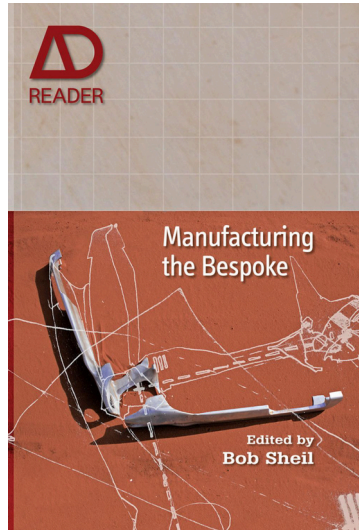
CAPITOLO 2 – STATO DELL'ARTE

Il Capitolo 2 analizza criticamente lo stato dell'arte nei campi della morfogenesi computazionale e della fabbricazione digitale, evidenziando la persistente separazione tra formalizzazione geometrica, regimi produttivi e dinamiche materiali.

Nonostante l'elevato sviluppo dei singoli ambiti, manca una strutturazione metodologica capace di integrare tali dimensioni in un sistema coerente di co-evoluzione forma-processo. Questa discontinuità strutturale costituisce il gap teorico e operativo che la ricerca intende affrontare.

Keywords

*Biomimesi
Morfogenesi naturale
Pattern ricorsivi
Auto-organizzazione
Adattività morfologica*



Sheil, 2012

Manufacturing the Bespoke

Wiley

2.1 Formalizzazione computazionale del biomorfismo

Nel quadro del design computazionale, il biomorfismo assume rilevanza teorica solo quando cessa di operare come repertorio analogico o come trasferimento figurativo di immagini naturali e viene invece trattato come sistema formalizzabile, nel senso di codificabile, esplicitabile o strutturabile. Il passaggio decisivo consiste proprio nello spostamento dalla forma come oggetto rappresentato alla forma come struttura relazionale, parametrica o algoritmica, cioè come insieme esplicito di regole, vincoli e procedure generative. In questo senso, il contributo del primo design digitale risiede, oltre che nell'aver ampliato il lessico formale disponibile, nell'aver ridefinito l'ambiente epistemico del progetto: la morfologia diventa trattabile come costruzione computazionale, mentre i sistemi parametrici vengono assunti come collezioni vincolate di schemi e relazioni¹⁻³.

Su questa base, anche il biomorfismo in architettura cambia status. Non coincide più con un generico richiamo alla natura, ma con il tentativo di trasferire nel progetto logiche di formazione, processi morfogenetici e modalità di organizzazione della complessità. La letteratura più avvertita insiste proprio su questo scarto: Menges mostra come i processi di biomimetic design in architettura debbano essere distinti da quelli più consueti dell'ingegneria, perché non si limitano a imitare soluzioni naturali date ma costruiscono procedure progettuali specifiche alla disciplina; Roudavski, parallelamente, problematizza il ricorso al termine morphogenesis in architettura, chiarendo che esso acquista senso solo quando viene sostenuto da modelli procedurali e computazionali, non da mere analogie descrittive; Hensel e Menges, infine, spostano ulteriormente il discorso verso una morpho-ecological design logic che lega formazione, comportamento e ambiente. In questo primo blocco dello stato dell'arte, il biomorfismo computazionale emerge dunque come strutturazione di processi, non come stilizzazione della natura⁹⁻¹¹.

Tale avanzamento, tuttavia, non esaurisce il problema. Una parte importante della ricerca ha già cercato di oltrepassare la sola generazione geometrica introducendo il ruolo attivo delle proprietà materiali, dei comportamenti performativi e dei processi di materializzazione. In questa direzione, Material Computation e Material-based Design Computation rappresentano passaggi cruciali, perché mostrano che geometria e materia non possono più essere trattate come domini separati e che determinate proprietà fisiche possono entrare nella generazione stessa della forma. Si tratta di contributi essenziali, perché incrinano l'idea di una computazione puramente

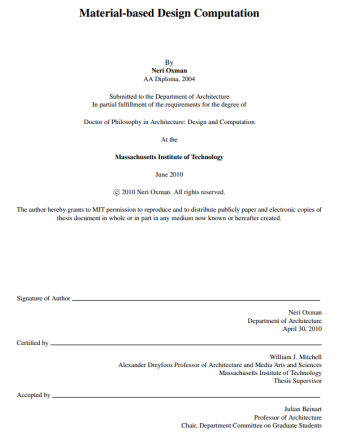
astratta; tuttavia, il loro asse principale resta ancora centrato sull'integrazione tra forma, comportamento materiale e performance, più che sulla esplicitazione di una relazione metodologica stabile tra core generativo e pluralità dei regimi produttivi^{5,8}.

Da questo corpus emerge, quindi, un limite preciso: la codificazione computazionale del biomorfismo ha prodotto modelli sempre più efficaci nel descrivere, generare e modulare complessità morfologiche, ma nella maggior parte dei casi continua a lavorare entro il dominio della generazione, della simulazione o della performance. Anche nei contributi più avanzati, la questione della producibilità tende a comparire come sviluppo successivo, come vincolo situato o come problema di traduzione tecnica, non ancora come componente strutturalmente interna alla definizione del modello morfogenetico^{1,8,9}.

2.2 Regimi di fabbricazione digitale

Il secondo asse critico riguarda il modo in cui tale complessità entra in rapporto con la produzione. In questo campo, il passaggio decisivo è quello dal paradigma CAD/CAM, centrato sulla traducibilità del modello digitale in istruzioni operative, a un ecosistema più ampio di fabbricazione digitale nel quale modellazione, simulazione, generazione del codice macchina, controllo della lavorazione e assemblaggio vengono progressivamente ricondotti entro workflow integrati. La letteratura su questo punto è ormai consolidata: Kolarevic legge la trasformazione digitale dell'architettura come ridefinizione congiunta di concezione, progetto e produzione; Schodek e collaboratori, dal lato CAD/CAM, mostrano come il modello digitale diventi l'ambiente di coordinamento tra rappresentazione e manifattura, non un semplice supporto descrittivo^{4,12}.

In questa prospettiva, manifattura additiva, lavorazioni sottrattive, fabbricazione robotica e processi ibridi devono essere letti come regimi produttivi differenti, ciascuno dotato di una propria logica di producibilità. Cambiano infatti le condizioni di accessibilità utensile, orientamento, stratificazione o asportazione, continuità o discontinuità del percorso utensile, tolleranze, sequenze operative, simulazioni preventive e rapporto con il materiale. La letteratura sulla fabbricazione robotica insiste precisamente su questo punto, mostrando che il ricorso ai robot introduce una diversa articolazione tra informazione digitale, comportamento costruttivo e materializzazione; in parallelo, i due workflow presi in esame mostrano in modo molto esplicito che, tanto nel caso sottrattivo robotico quanto in quello additivo per estrusione, la produzione richiede passaggi intermedi di CAM, simulazione, slicing, verifica di stampabilità o di



Oxman, 2004

Material-based design computation

M.I.T.



Gramazio & Kohler, 2014

The Robotic Touch: How Robots Change Architecture

Park Books

collisione e definizione delle strategie operative, cioè veri e propri filtri di producibilità^{13,6}.

Tuttavia, proprio qui emerge il limite critico dello stato dell'arte. Anche quando la fabbricazione digitale è trattata in modo avanzato, essa viene spesso descritta come un insieme di procedure di traduzione, ottimizzazione o prototipazione applicate a valle di una forma già sostanzialmente definita. In questo senso, una parte importante della letteratura ha chiarito con grande efficacia **come** produrre geometrie complesse, ma meno spesso ha formalizzato **come la producibilità partecipi alla definizione stessa della forma**. Il lessico del making, del prototyping e del bespoke manufacturing ha certamente incrinato il modello lineare progetto-esecuzione, ma non sempre ha trasformato questa incrinatura in un modello teorico sufficientemente stabile della relazione tra sistema generativo e regime produttivo^{7,4}.

Risulta dunque che la letteratura sui regimi di fabbricazione digitale ha prodotto un avanzamento decisivo nella descrizione dei vincoli, delle potenzialità e delle catene operative della produzione computazionalmente mediata, ma non ha ancora pienamente stabilizzato un quadro nel quale tali regimi siano pensati come componenti interne del modello morfogenetico.

2.3 Materialità e interazione forma-processo

Il terzo asse dello stato dell'arte riguarda il passaggio da una concezione della materia come supporto passivo della forma a una concezione della materialità come agente operativo del progetto. In questa prospettiva, il punto non è soltanto che il comportamento del materiale debba essere considerato durante la verifica o la costruzione, ma che esso possa entrare nella definizione stessa dei processi formativi. Una parte rilevante della letteratura sulla morfogenesi digitale insiste proprio su questo spostamento: il progetto viene letto come articolazione di processi in cui performance, materialità e dinamiche di formazione concorrono alla configurazione morfologica. In tal senso, il lessico della morphogenesis tende a sostituire la centralità della rappresentazione con quella del processo, mentre la ricerca su biomimetic e morphogenetic design in architettura si orienta verso procedure capaci di integrare comportamento, ambiente e costruzione della forma^{14,9}.

Il contributo più forte di questa linea di ricerca emerge nei concetti di Material Computation e Material-based Design Computation. In entrambi i casi, la tesi di fondo è che forma, materiale e struttura possano essere trattati come variabili reciprocamente implicate fin dall'origine del processo progettuale. Menges definisce la material

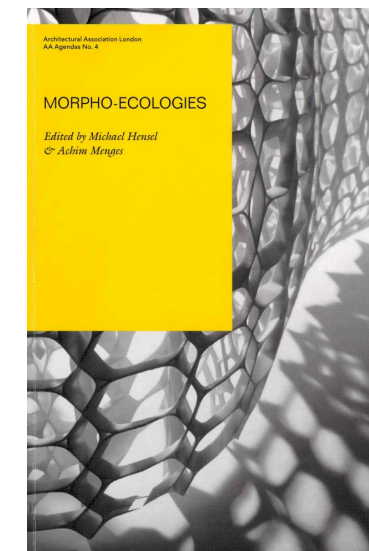
computation come una maggiore integrazione nel morphogenetic design, mentre Oxman sviluppa una nozione di material-based design computation esplicitamente orientata all'integrazione tra form-finding computazionale, proprietà materiali e struttura. Si tratta di un passaggio teoricamente decisivo, perché incrina la separazione moderna tra ideazione geometrica e specificazione materiale e apre a modelli nei quali la materia non segue la forma, ma partecipa alla sua generazione^{5,8,15}.

Accanto a questa linea, gli approcci riconducibili al design-through-making e, più tardi, al cyber-physical making hanno rafforzato ulteriormente l'idea che processo costruttivo, comportamento materiale e intelligenza della fabbricazione non debbano essere relegati a una fase terminale. Qui l'avanzamento consiste nel riconoscere che la conoscenza progettuale può emergere attraverso prototipazione, feedback di processo, controllo iterativo e confronto continuo tra modello e materializzazione. Tuttavia, proprio in questa famiglia di contributi emerge anche un limite ricorrente: la relazione tra forma, materia e processo viene spesso costruita dentro workflow fortemente dipendenti da uno specifico materiale, da una singola tecnologia o da una particolare catena di fabbricazione. Il risultato è un avanzamento significativo sul piano sperimentale, ma non sempre una metodologia trasferibile tra regimi produttivi differenti^{7,16}.

Il quadro che emerge è quindi duplice: da un lato, la letteratura sulla materialità e sull'interazione forma-processo ha compiuto un passo essenziale, perché ha mostrato che la forma non può essere compresa né prodotta come pura entità geometrica indipendente dalla sua condizione materiale e operativa; dall'altro, tale avanzamento resta spesso articolato in modelli di integrazione locali, potenti ma contestuali, nei quali il nesso tra generazione, materiale e produzione è costruito caso per caso. Manca ancora, in termini sufficientemente espliciti e generalizzabili, un modello metodologico capace di descrivere come un core generativo possa mantenere la propria coerenza strutturale mentre viene ridefinito dall'interazione con materiali e regimi produttivi diversi^{5,8,16}.

2.4 Sintesi critica e identificazione del gap

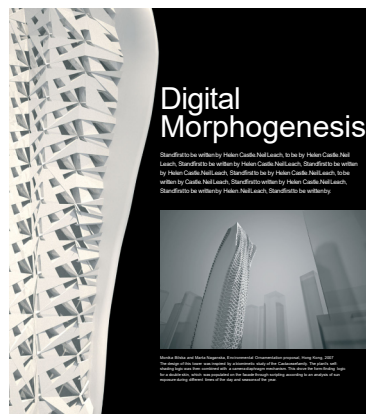
La ricognizione condotta nei tre paragrafi precedenti consente di riconoscere tre avanzamenti reali e ormai consolidati nello stato dell'arte: in primo luogo, la morfologia trattabile come struttura relazionale; in secondo luogo, la ridefinizione del rapporto tra modello e costruzione; in terzo luogo, l'aver mostrato che materia, comportamento e performance non possono più essere trattati come variabili esterne rispetto alla costruzione della forma. Presi singo-



Hensel & Menges, 2008

Designing Morpho-Ecologies: Versatility and Vicissitude of Heterogeneous Space

Archit. Design., 78



Leach, 2009

Digital Morphogenesis

Archit. Design., 79

larmente, questi tre campi hanno quindi prodotto un avanzamento teorico e operativo tutt'altro che marginale.

Tuttavia, proprio la loro forza rende più visibile la persistenza di una separazione strutturale. Le codificazioni morfogenetiche più robuste restano spesso centrate sul dominio della generazione, della variazione e della simulazione; i contributi sulla fabbricazione digitale descrivono con precisione crescente i processi di traduzione, controllo e produzione, ma più raramente li assumono come componenti interne del modello generativo; gli approcci material-oriented, infine, introducono una relazione molto più stretta tra forma, comportamento e processo, ma tendono spesso a farlo entro configurazioni altamente situate, fortemente dipendenti da un materiale, da una macchina o da una specifica catena operativa. Ne deriva che la convergenza tra questi tre assi è reale, ma per lo più parziale: più spesso intersezione locale di domini avanzati che strutturazione stabile di un sistema unitario.

Il gap che emerge non riguarda dunque l'assenza di strumenti, né la scarsità di casi studio, né la mancanza di sperimentazioni capaci di collegare computation, making e materialisation. Al contrario, la letteratura dimostra che tali connessioni esistono già e che, in molti casi, sono anche metodologicamente sofisticate. Ciò che non risulta ancora espresso in maniera esaustiva è un modello relazionale capace di esplicitare il rapporto tra sistema generativo, variazione parametrica, regime produttivo e condizione di producibilità, senza ridurre la produzione a semplice verifica finale né dissolvere la specificità del core morfogenetico dentro singole soluzioni contingenti.

Su questa base, il contributo atteso della tesi può essere letto con maggiore precisione: la ricerca diverge dalla volontà di aggiungere un ulteriore caso di studio alla costellazione già ampia del design computazionale o della fabbricazione digitale, ma propone una formalizzazione nella quale il core morfogenetico resti strutturalmente esplicito mentre la sua traducibilità venga ridefinita attraverso l'interazione con regimi produttivi differenti.

2.5 Raccordo tecnico tra stato dell'arte e processi adottati

La ricognizione condotta nel presente capitolo assume come base gli avanzamenti già maturati nel campo del design computazionale, della Material Computation, del design-through-making e della fabbricazione digitale. Tali linee di ricerca hanno progressivamente superato una lettura lineare del rapporto tra ideazione formale e realizzazione materiale, mostrando come comportamento fisico, processo costruttivo e feedback operativo possano partecipare alla definizione del progetto. La presente tesi si inserisce in questo quadro,



CD/ITKE Research Pavilion in 2011 of the institute of computer-based sketching (ICD) of the university of Stuttgart in the town garden in Stuttgart middle, Baden-Württemberg, Germany. © MSeses / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0



ICD/ITKE Research Pavilion, Achim Menges e Jan Knippers, University of Stuttgart, 2013–2014. Fonte: Wikimedia Commons, CC0.

orientando però l'attenzione verso un problema specifico: esplicitare il rapporto tra un core algoritmico morfogenetico, lo spazio delle sue varianti e le condizioni di producibilità introdotte da regimi produttivi differenti. In questo senso, il contributo metodologico della ricerca risiede nella costruzione di una struttura di lettura capace di collegare invarianti generative e variabili produttive entro un medesimo processo di verifica.

Sul piano algoritmico, la tesi si colloca nel campo della modellazione implicita e delle superfici di livello. Il riferimento alle funzioni implicite consente di descrivere la morfologia come esito di un campo scalare valutato nello spazio, nel quale la superficie emerge dall'estrazione di un valore soglia. Tale impostazione permette di trattare la forma come struttura generativa continua, manipolabile attraverso parametri numerici e traducibile in geometria discreta mediante procedure di campionamento e mesh extraction. In questa prospettiva, la letteratura sulle Implicit Surfaces e l'algoritmo Marching Cubes costituiscono riferimenti tecnici centrali, poiché definiscono il passaggio dal campo scalare alla superficie poligonale come momento operativo di conversione tra descrizione matematica e modello geometrico manipolabile ^{19,22}.

Le superfici minime periodiche vengono assunte come prima famiglia morfogenetica perché permettono di lavorare su strutture continue, tridimensionalmente periodiche e caratterizzate da una forte regolarità topologica. Il riferimento alle superfici minime consente di inquadrare le TPMS come sistemi nei quali la complessità morfologica deriva da una relazione matematica compatta, capace di generare campi spaziali articolati attraverso la variazione di pochi parametri ²⁰.

Le strutture frattali costituiscono invece una seconda famiglia, fondata su logiche iterative e ricorsive. Il loro inserimento nella ricerca amplia il campo di validazione del core, perché introduce sistemi nei quali la complessità emerge dall'accumulazione progressiva di trasformazioni nello spazio, secondo una logica distinta dalla continuità periodica delle TPMS. Il riferimento alla geometria frattale permette di interpretare queste forme come sistemi morfogenetici generati da regole ripetute, sensibili alla variazione dei parametri di iterazione, scala, soglia e risoluzione ²¹.

Sul piano produttivo, i processi adottati nella tesi sono riconducibili a tre regimi distinti: fabbricazione additiva diretta, lavorazione sottrattiva robotica e fabbricazione indiretta mediante cassaforma sacrificabile. Nell'ambito della fabbricazione additiva diretta la verifica della stampabilità interviene nella selezione delle configurazioni effettivamente trasferibili dal modello digitale al prototipo fisico. Il riferimento alle ricerche sulla stampabilità di geometrie comples-

se e alla simulazione del comportamento durante la stampa consente di collocare il caso additivo all'interno di un quadro tecnico in cui forma, materiale e processo vengono valutati congiuntamente ^{6,23}.

Il regime sottrattivo robotico introduce una diversa logica di producibilità. La complessità della morfologia viene misurata rispetto alla possibilità di raggiungere fisicamente le superfici da lavorare e di organizzare il volume in parti producibili. La fabbricazione robotica, in questo senso, opera come ambiente in cui il modello digitale viene reinterpretato attraverso traiettorie, vincoli cinematici e procedure di controllo. Il riferimento alla robotica in architettura e alla Digital Materiality consente di leggere il caso sottrattivo come un regime in cui la forma diventa producibile attraverso una mediazione tra informazione geometrica e comportamento della macchina ¹³.

La fabbricazione indiretta mediante cassaforma sacrificabile introduce un ulteriore passaggio. In presenza di una morfologia difficilmente affrontabile tramite lavorazione diretta, il problema produttivo viene trasferito dalla realizzazione dell'oggetto alla costruzione del suo negativo. La stampa della cassaforma in materiale dissolvibile permette di rendere materializzabile una geometria complessa attraverso una strategia intermedia, nella quale il manufatto finale deriva dalla relazione tra forma negativa, colata, maturazione e rimozione del supporto. Questo regime amplia la nozione di producibilità perché mostra che la verifica può riguardare anche dispositivi ausiliari, temporanei e sacrificabili.

Considerati congiuntamente, questi riferimenti tecnici chiariscono il rapporto tra stato dell'arte e sperimentazione, consentendo di collocare con maggiore accuratezza il contributo della ricerca. Il valore della tesi risiede nell'organizzazione di tecniche e processi già consolidati entro una struttura metodologica unitaria, capace di mettere in relazione modellazione implicita, variazione parametrica e verifica di producibilità.

Formalizzazione del biomorfismo

C.3

Capitolo Terzo

Dal modello
matematico alla
struttura algoritmica

Sinossi del capitolo

C-3

CAPITOLO 3 – FORMALIZZAZIONE DEL BIOMORFISMO COMPUTAZIONALE

Il Capitolo 3 definisce il core morfogenetico della ricerca, codificato matematicamente e implementato algebricamente attraverso famiglie biomorfiche implicite parametriche. Le superfici minime periodiche sono trattate come funzioni implicite analitiche continue, mentre le strutture frattali sono strutturate come funzioni implicite generate mediante iterazione ricorsiva controllata da parametro. In entrambi i casi, le funzioni sono implementate come campi scalari tridimensionali valutati su griglia volumetrica e convertiti in superfici di livello discretizzate in mesh poligonale. Il capitolo dimostra l'invarianza strutturale del core algoritmico rispetto alla variazione parametrica e ne stabilisce le condizioni di robustezza e trasferibilità, ponendo le basi formali per la successiva integrazione con i regimi produttivi.

Keywords

Funzione implicita

*Campo scalare
tridimensionale*

Iso-superficie

*Discretizzazione
volumetrica*

3.1 Definizione operativa di biomorfismo computazionale

Il termine *biomorfismo*, nel dibattito architettonico e progettuale del Novecento, è stato frequentemente associato a esiti figurativi che evocano il mondo organico attraverso analogie morfologiche. In tale accezione, il riferimento al biologico si configura come imitazione stilistica o come trasposizione simbolica di forme naturali in ambito artificiale. Tuttavia, una simile interpretazione risulta insufficiente nel contesto del design computazionale contemporaneo, dove la questione non riguarda la somiglianza visiva, bensì la struttura generativa sottostante alla morfologia.

La presente ricerca assume pertanto una posizione teorica esplicita: il biomorfismo computazionale è una classe di sistemi formali nei quali la forma emerge dall'esecuzione di regole matematiche esplicite. Il riferimento al biologico non è analogico, ma strutturale e processuale. Il processo è codificabile ed esplicitabile. La centralità si trasferisce dal risultato visibile al processo che lo rende possibile.

Una simile impostazione trova una prima formulazione teorica nella lettura morfologica proposta in *On Growth and Form*¹⁷, dove le trasformazioni delle strutture biologiche vengono interpretate come effetti di relazioni matematiche sottostanti piuttosto che come configurazioni isolate. In tale prospettiva, la morfologia non è una forma "data", ma l'esito di un campo relazionale formalizzabile. Questa impostazione segna un passaggio cruciale: il biologico diventa paradigma di organizzazione strutturale, non repertorio iconografico.

In ambito progettuale, tale paradigma viene reinterpretato in chiave computazionale in *An Evolutionary Architecture*¹⁸, dove l'architettura è concepita come sistema generativo capace di produrre morfologia attraverso regole algoritmiche. La forma è l'espressione di un sistema dinamico formalizzato e non soltanto il risultato di una decisione compositiva puntuale. La progettazione si configura così come definizione di un insieme di relazioni operative.

Più recentemente, *Material Computation*⁵ ha ulteriormente consolidato questa prospettiva, ridefinendo la morfogenesi in termini sistemici e computazionali. In tale impostazione, il comportamento della forma è intrinseco al sistema che la genera; la morfologia emerge come stato contingente di una struttura relazionale formalizzata.

All'interno di questo quadro teorico, la morfologia viene intesa come esito di un processo generativo esplicito e la forma diviene manifestazione contingente di una relazione formalizzata, non es-

sendo più entità autonoma. Questo passaggio consente di distinguere con chiarezza tra *apparenza organica* e *struttura generativa biomorfica*: una configurazione può presentare caratteristiche visivamente fluide o complesse senza essere il risultato di un sistema morfogenetico formalizzato; viceversa, un sistema generativo può produrre esiti non immediatamente riconducibili all'immaginario organico pur condividendone la logica processuale.

Nel presente lavoro, il biomorfismo computazionale viene quindi definito operativamente come classe di sistemi generativi formalizzabili, ossia codificabili e strutturabili, in cui la morfologia emerge dall'esecuzione di regole matematiche esplicite, capaci di produrre strutture dotate di coerenza interna e stabilità parametrica. Due proprietà strutturali risultano centrali in tale definizione: la continuità e la ricorsività.

La continuità si riferisce a sistemi nei quali la morfologia deriva da relazioni analitiche capaci di generare campi morfologici privi di discontinuità locali intrinseche; la ricorsività, invece, descrive sistemi nei quali la complessità emerge dalla reiterazione controllata di una regola elementare. Queste due modalità sono assunte come proprietà strutturali dei processi generativi e costituiscono le condizioni operative che permettono la successiva formalizzazione matematica dei modelli trattati nel capitolo.

3.2 Modelli morfogenetici come funzioni implicite parametriche

La definizione operativa di biomorfismo computazionale introdotta nel paragrafo precedente consente ora di circoscrivere il dominio formale entro cui collocare i modelli morfogenetici trattati nella presente ricerca. Se la morfologia è assunta come esito di un processo generativo esplicito, risulta necessario individuare una struttura matematica capace di descrivere tale processo in modo coerente, stabile e trasferibile.

Le rappresentazioni geometriche tradizionali — basate su descrizioni esplicite o su modellazione parametrica locale — risultano parzialmente inadeguate a questo scopo. Esse descrivono la forma come insieme di entità geometriche composte o come superfici definite attraverso relazioni dirette tra variabili indipendenti e dipendenti. In tali sistemi, la morfologia è generalmente costruita attraverso operazioni additive o trasformative applicate a elementi discreti. La continuità globale della forma emerge dalla composizione, non da una relazione unitaria sottostante.

Nel quadro teorico qui adottato, al contrario, la morfologia viene descritta come soluzione di una relazione implicita definita sull'intero

dominio spaziale. La superficie emerge come condizione di equilibrio di un campo relazionale. Questa impostazione consente di trattare la forma come esito di una funzione definita nello spazio tridimensionale, la cui valutazione produce un campo scalare continuo dal quale è possibile derivare una configurazione morfologica coerente.

L'adozione del modello implicito introduce un cambio di paradigma epistemologico: la forma non è più rappresentata come oggetto delimitato da confini espliciti, ma come stato di un sistema relazionale distribuito nello spazio. Tale impostazione trova una formalizzazione sistematica nell'ambito della modellazione implicita e dei cosiddetti *field-based models*, ampiamente trattati in *Implicit Surfaces*¹⁹, dove la superficie viene definita come iso-livello di un campo scalare.

In questo contesto, la nozione di parametro assume un ruolo centrale. Il parametro interviene come variabile interna al sistema generativo. La variazione parametrica non altera la struttura dell'algoritmo, bensì ne attraversa lo spazio delle possibilità morfologiche. In altri termini, il parametro agisce come coordinata interna di uno spazio continuo di configurazioni.

Questa distinzione è cruciale: modificare un parametro non equivale a riscrivere l'algoritmo. Nel primo caso si esplora un dominio generativo già definito; nel secondo si altera la struttura del sistema stesso. La presente ricerca assume come condizione metodologica la separazione netta tra variazione parametrica e mutazione algoritmica. La stabilità del core morfogenetico dipende precisamente da questa distinzione.

L'adozione di funzioni implicite parametriche consente inoltre di unificare formalmente sistemi di natura differente. Modelli continui, come le superfici minime periodiche, e modelli ricorsivi, come le strutture frattali, possono essere ricondotti a una stessa architettura descrittiva: entrambi definiscono relazioni spaziali valutabili su dominio tridimensionale e controllabili attraverso parametri interni. La differenza ontologica tra continuità analitica e iterazione ricorsiva non implica incompatibilità strutturale a livello implementativo.

Questo aspetto risulta particolarmente rilevante per l'impianto della tesi. Se il biomorfismo computazionale è definito come classe di sistemi generativi formalizzabili, allora la funzione implicita parametrica costituisce il dispositivo matematico capace di rendere tale classe operativamente trattabile. Essa permette di:

- descrivere la morfologia come relazione distribuita;
- mantenere l'unità strutturale del sistema sotto variazione continua;

- garantire coerenza tra differenti famiglie morfogenetiche;
- separare concettualmente struttura algoritmica e stato parametrico.

L'adozione del paradigma implicito parametrico non costituisce quindi una semplice scelta tecnica, bensì una condizione strutturale della formalizzazione proposta nel presente capitolo.

3.3 Formalizzazione matematica delle superfici minime periodiche (TPMS)

All'interno del quadro delineato nel paragrafo precedente, le superfici minime periodiche tridimensionali costituiscono un caso paradigmatico di sistema morfogenetico continuo descrivibile mediante funzione implicita parametrica. Esse rappresentano un dominio di particolare interesse poiché coniugano proprietà matematiche rigorose con caratteristiche morfologiche coerenti con l'impianto relazionale adottato nella presente ricerca.

Dal punto di vista matematico, una superficie minima è definita come "superficie a curvatura media nulla in ogni suo punto". Tale condizione implica che la superficie rappresenti localmente una configurazione di equilibrio differenziale, priva di preferenza direzionale nella distribuzione della curvatura.

Le superfici minime periodiche tridimensionali (Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS) estendono questa condizione introducendo una periodicità spaziale lungo le tre direzioni cartesiane. Esse possono essere descritte come configurazioni che si ripetono identicamente nello spazio secondo una cella fondamentale, generando una tessellazione continua e topologicamente coerente. La periodicità tridimensionale costituisce una proprietà strutturale: la morfologia è definita come campo estendibile indefinitamente.

Un riferimento matematico sistematico per lo studio delle superfici minime è *A Survey of Minimal Surfaces*²⁰, che ne formalizza le proprietà differenziali e topologiche. Nel contesto computazionale, tuttavia, le TPMS vengono frequentemente trattate attraverso approssimazioni analitiche espresse in forma implicita, che consentono una rappresentazione operativamente gestibile.

Un esempio classico è la superficie detta **Giroide**, descrivibile attraverso un'equazione implicita del tipo:

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0$$

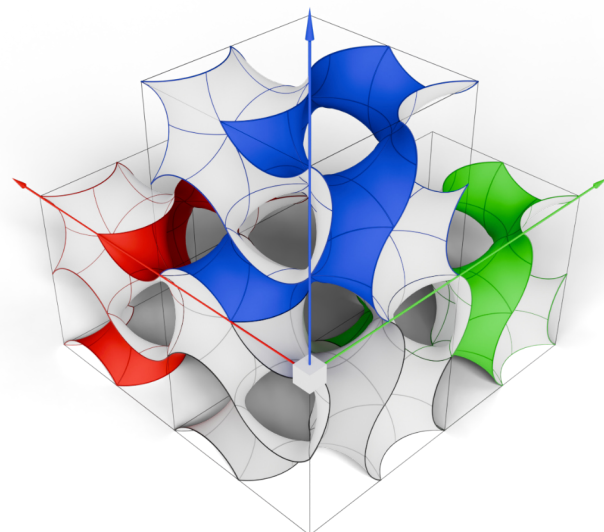
In questa formulazione, la superficie emerge come insieme dei punti dello spazio che soddisfano la relazione implicita. L'equazione definisce un campo scalare continuo, e la morfologia corrisponde al suo iso-livello nullo. È importante sottolineare che l'equazione rappresenta un'approssimazione operativa della condizione di minimalità, ma mantiene le proprietà strutturali fondamentali di periodicità e continuità.

La rappresentazione implicita rende evidente la coerenza con l'impianto teorico del capitolo: la forma emerge come soluzione di una relazione analitica globale. La variazione parametrica — ad esempio attraverso fattori di scala, traslazioni di fase o offset volumetrici — attraversa lo spazio delle configurazioni possibili, mantenendo invariati la struttura dell'equazione il core generativo.

La nozione di cella fondamentale assume qui un ruolo centrale. Essa rappresenta il dominio minimo entro cui la superficie esprime la propria struttura completa, consentendo la ricostruzione dell'intero campo morfologico tramite traslazione periodica.

Figura 3.1

Cella fondamentale di una superficie minima periodica tripla (Giroide), con evidenziazione delle direzioni di periodicità tridimensionale e della continuità morfologica attraverso le facce della cella unitaria.



La figura della cella fondamentale chiarisce visivamente la relazione tra periodicità matematica e organizzazione spaziale. La continuità differenziale della funzione generativa si traduce in una morfologia priva di giunzioni o discontinuità locali, distinguendo i sistemi continui dalle strutture ricorsive trattate nel paragrafo successivo.

Dal punto di vista morfologico, le TPMS presentano interconnessione spaziale, doppia curvatura distribuita e organizzazione omogenea del volume. Tali caratteristiche vengono interpretate come esiti

geometrici coerenti con la struttura analitica sottostante, prescindendo da finalità puramente performative.

All'interno della presente ricerca, le superfici minime periodiche costituiscono quindi il primo dominio di formalizzazione della classe di sistemi impliciti parametrici. Esse dimostrano come una relazione analitica continua possa generare variazione morfologica controllata senza alterazione della struttura algoritmica, confermando l'invarianza del core morfogenetico sotto variazione parametrica.

3.4 Formalizzazione matematica delle strutture frattali come sistemi iterativi ricorsivi

Se le superfici minime periodiche rappresentano l'espressione paradigmatica di un sistema morfogenetico continuo, le strutture frattali costituiscono il secondo dominio formale considerato in questa ricerca, fondato sulla ricorsività iterativa. La differenza tra le due famiglie riguarda la natura della regola generativa che ne governa l'emergenza, indipendentemente dal grado di complessità o di articolazione spaziale.

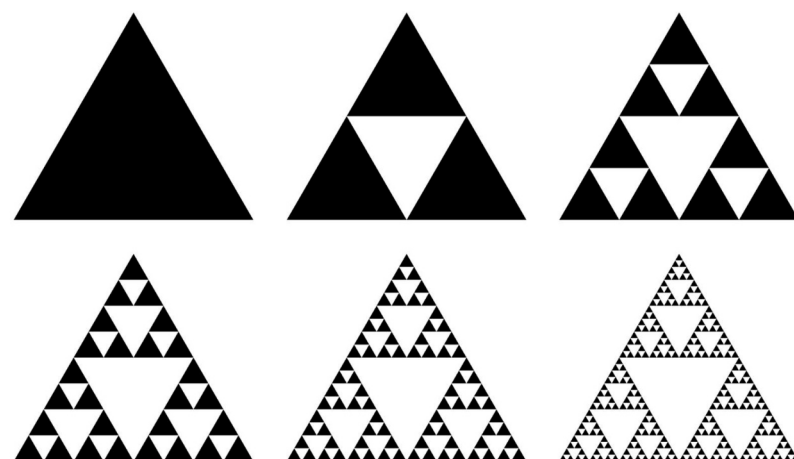
Un sistema frattale può essere descritto come struttura generata dall'applicazione reiterata di una trasformazione elementare secondo una regola definita. La morfologia deriva dall'accumulo progressivo di operazioni locali che si replicano secondo uno schema coerente. La complessità globale emerge come esito dell'iterazione.

Il riferimento fondativo per la formalizzazione matematica dei frattali è *The Fractal Geometry of Nature*²¹, che introduce una descrizione sistematica di strutture caratterizzate da auto-similarità e organizzazione gerarchica. In tale prospettiva, il frattale è un sistema governato da una legge di generazione precisa, non una forma esteticamente irregolare, capace di produrre configurazioni spaziali attraverso iterazione controllata.

Dal punto di vista formale, un sistema iterativo ricorsivo può essere descritto come insieme di trasformazioni applicate ripetutamente a un dominio iniziale. Ogni livello di iterazione produce una nuova configurazione che conserva, in forma scalata o trasformata, la struttura della precedente. La profondità di iterazione costituisce un parametro interno al sistema: modificandola, si attraversano differenti stati morfologici senza alterare la regola generativa di base.

Figura 3.2

Progressione iterativa del triangolo di Sierpinski come esempio di sistema ricorsivo: dal dominio iniziale ai successivi livelli di iterazione, con variazione della profondità iterativa.



L'auto-similarità non deve essere intesa necessariamente come ripetizione esatta, ma come coerenza strutturale tra livelli differenti.

Anche nei casi in cui la similarità sia statistica o parziale, la morfologia mantiene una logica gerarchica riconducibile alla regola originaria. La complessità è una manifestazione della stabilità della trasformazione iterata, non un accumulo casuale

Nel contesto della presente ricerca, ciò che assume rilievo è la natura ricorsiva del processo generativo. La struttura frattale viene qui trattata come sistema formalizzabile in cui la morfologia emerge dall'esecuzione reiterata di una regola esplicita, controllabile attraverso parametri interni quali profondità di iterazione, fattori di scala o variazioni trasformative.

Figura 3.3

Progressione iterativa di una struttura frattale generata da regola ricorsiva: evidenziazione della gerarchia morfologica e della conservazione strutturale tra livelli successivi.



Sebbene la logica generativa differisca da quella analitica continua delle TPMS, anche il sistema frattale può essere ricondotto all'architettura implicita parametrica delineata nel paragrafo 3.2. La configurazione spaziale risultante può essere interpretata come stato di un sistema valutabile su dominio tridimensionale, nel quale la ricorsività agisce come meccanismo interno di organizzazione.

All'interno del capitolo, le strutture frattali completano quindi il quadro delle due modalità fondamentali di biomorfismo computazionale adottate: continuità e ricorsività. Esse costituiscono il secondo dominio di verifica della classe di sistemi impliciti parametri-

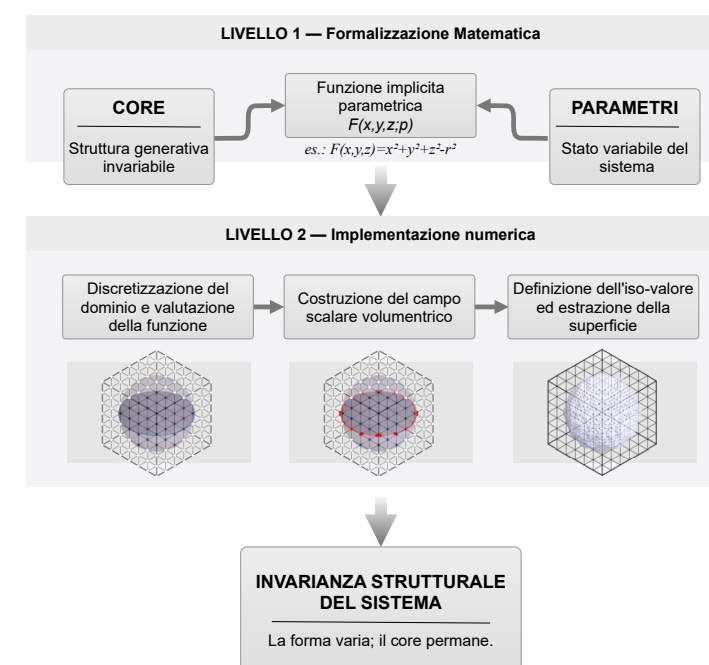
ci, dimostrando che la variazione morfologica può essere controllata attraversando lo spazio parametrico del sistema senza riscriverne la struttura generativa.

3.5 Architettura implementativa del core morfogenetico: funzione → campo scalare volumetrico → estrazione di superficie di livello

L'esplicitazione dei modelli morfogenetici come funzioni implicite parametriche, discussa nei paragrafi precedenti, richiede una traduzione operativa capace di renderli computazionalmente valutabili. Se la morfologia è definita come soluzione di una relazione implicita nello spazio tridimensionale, diventa necessario costruire un'architettura implementativa che consenta di trasformare la descrizione matematica in una configurazione geometrica discretizzata, osservabile e manipolabile. Il passaggio dall'equazione alla forma avviene attraverso la costruzione di un campo scalare distribuito nello spazio e la successiva estrazione della relativa superficie di livello.

Schema 3.1

Architettura implementativa del core morfogenetico



Il core morfogenetico della presente ricerca si fonda su un iter articolato in due livelli strutturali:

1. definizione della funzione generativa, in cui core e parametri contribuiscono alla formalizzazione matematica;
2. valutazione su dominio volumetrico discreto, costruzione del campo scalare tridimensionale ed estrazione della superficie di livello per la generazione della mesh poligonale che rappresentano l'implementazione numerica.

Questa sequenza costituisce l'architettura operativa che rende trattabile l'intera classe di sistemi impliciti parametrici introdotta nel capitolo. Il suo carattere strutturale dipende dal fatto che ciò che resta stabile non è la singola espressione morfologica, ma la logica mediante cui una relazione implicita viene valutata nello spazio, tradotta in campo e infine resa esplicita come superficie discretizzata. In questa ricerca tale architettura è stata implementata in ambiente Geometry Nodes all'interno di Blender come dispositivo node-based capace di rendere operativa e leggibile la struttura relazionale del core.

3.5.1 Funzione generativa

Il primo livello è rappresentato dalla funzione generativa, continua o ricorsiva a seconda della famiglia morfogenetica considerata. Essa definisce una relazione spaziale parametrica che associa a ogni punto del dominio tridimensionale un valore scalare. In questa fase il sistema è ancora puramente formale: non esiste una superficie esplicita, ma una relazione valutabile.

La funzione costituisce il nucleo morfogeneticamente attivo del sistema. La variazione parametrica ne modifica lo stato interno senza alterarne la struttura, rendendo possibile la generazione di configurazioni differenti nel medesimo impianto algoritmico.

È tuttavia necessario distinguere con precisione tra **contenuto morfogenetico** e **struttura implementativa**. Il contenuto morfogenetico coincide con la specifica funzione che descrive la famiglia di forme considerata; la struttura implementativa coincide invece con il dispositivo che ne rende possibile la valutazione computazionale. Questa distinzione è decisiva, perché consente di comprendere in che senso il core possa restare stabile pur accogliendo istanze morfologiche differenti.

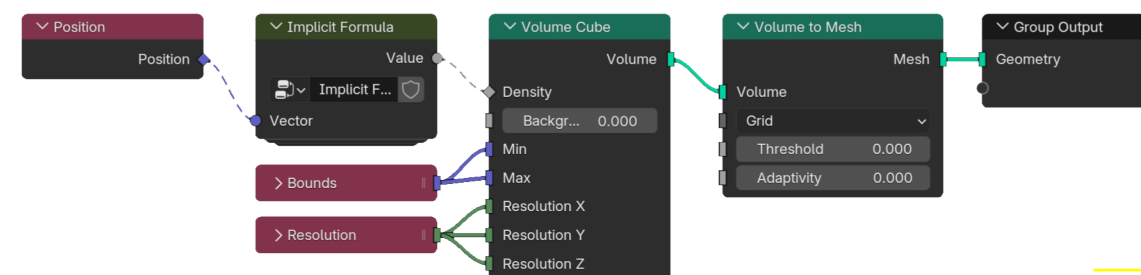
3.5.2 Discretizzazione del dominio e costruzione del campo scalare

Il secondo livello consiste nella discretizzazione del dominio continuo attraverso una griglia volumetrica tridimensionale. Tale operazione introduce una rappresentazione numerica del dominio spaziale che ne rende possibile la valutazione. Ogni punto della discretizzazione viene sottoposto alla funzione generativa, producendo

un valore scalare associato alla corrispondente posizione nello spazio. L'insieme di tali valori costituisce un campo scalare tridimensionale discreto.

La morfologia non è ancora esplicitata come superficie, ma emerge come struttura latente nel campo stesso. La forma, in questo stadio, coincide con una distribuzione relazionale di valori che descrive localmente il comportamento del sistema nello spazio.

Sul piano implementativo, questa logica assume la forma di una impalcatura node-based ricorrente: un dominio volumetrico di riferimento definisce l'estensione spaziale entro cui la funzione viene valutata; a tale dominio viene associato un campo di densità il cui valore in ogni punto deriva direttamente dalla funzione implicita. In Geometry Nodes questa struttura è organizzata attraverso un Volume Cube, che definisce il contenitore volumetrico discreto, e attraverso l'immissione della funzione nel parametro di Density, dove la relazione matematica viene tradotta in distribuzione spaziale di valori. In questo modo, la funzione non produce direttamente una mesh, ma controlla la configurazione del campo entro cui la superficie potrà successivamente emergere.



Schema 3.2

Struttura algoritmica sviluppata in ambiente di sviluppo grafico "Geometry Nodes": traduzione della funzione implicita in campo volumetrico discreto e successiva estrazione della mesh

3.5.3 Definizione del valore iso ed estrazione della superficie

La terza fase della pipeline prevede la selezione di un valore critico (isovalore) all'interno del campo scalare e la successiva estrazione della corrispondente superficie di livello. Tale componente geometrica intercetta l'insieme dei punti in cui la funzione assume il valore predefinito, operando come un'interfaccia di separazione tra regioni dello spazio caratterizzate da proprietà fisiche o numeriche divergenti.

L'estrazione non è un'operazione creativa, ma una procedura algoritmica che rende geometricamente esplicita una condizione già inscritta nel campo. Il risultato è una mesh poligonale che approssima la superficie implicita nel dominio discretizzato. Tale procedura è concettualmente riconducibile alle tecniche di **iso-surface ex-**

Figura 3.4

Esempio di variazione morfologica ottenuta agendo sul campo: configurazioni sheet/lattice e controllo dello spessore

traction sviluppate nell'ambito della visualizzazione volumetrica, come descritto in *Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm*²², in cui la superficie emerge come interfaccia estratta da una distribuzione tridimensionale di valori scalari.

Nel dispositivo implementativo adottato, questa fase è resa operativa dal nodo *Volume to Mesh*, che converte il volume definito dal campo di densità in una mesh tridimensionale composta da vertici, spigoli e facce. La mesh risultante rappresenta quindi la forma in quanto esito numericamente esplicitato del processo.

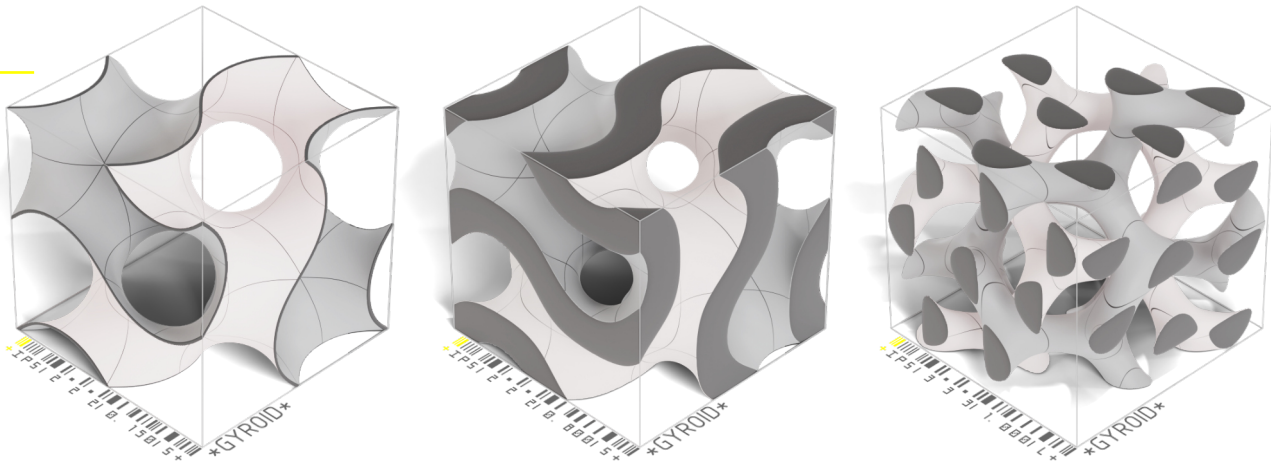
Dal punto di vista teorico, questa distinzione è essenziale. La mesh non coincide con la forma in senso forte, ma con una sua rappresentazione discretizzata. La forma appartiene alla logica relazionale della funzione e del campo; la mesh ne costituisce la traduzione geometrica operativa. Il core morfogenetico si colloca precisamente in questa tensione tra struttura implicita e rappresentazione esplicita.

3.5.4 Articolazione interna del campo e controllo della morfologia

Un aspetto particolarmente rilevante dell'architettura implementativa è che essa consente di intervenire sulla sua articolazione morfologica agendo ancora a livello di campo, prima della conversione finale in mesh. Il controllo della forma avviene come regolazione interna delle condizioni che ne determinano l'emersione.

Questo principio è particolarmente evidente nei casi in cui la stessa funzione implicita può generare configurazioni differenti in relazione al trattamento del campo e dei suoi parametri. La distinzione tra configurazioni di tipo **Lattice** (reticolare) e configurazioni di tipo **Sheet** (guscio), ad esempio, dipende da differenti modalità di interpretazione e impostazione della soglia della distribuzione scalare. Analogamente, il controllo dello spessore della superficie può essere ottenuto come modulazione della relazione che governa il campo e della soglia attraverso cui esso viene estratto.

Questa osservazione ha una conseguenza teorica importante: la morfologia finale è il risultato di una regolazione interna del sistema relazionale. Ciò rafforza l'idea che il core algoritmico non sia un



semplice generatore di forme, ma una struttura capace di produrre famiglie di configurazioni attraverso la variazione controllata delle condizioni di ottenimento della superficie.

3.5.5 Neutralità della pipeline rispetto alle famiglie morfogenetiche

Un aspetto cruciale dell'architettura implementativa è la sua neutralità rispetto alla natura della funzione generativa. La stessa pipeline **Funzione → Campo Scalare → Superficie di Livello** è infatti applicabile sia ai sistemi continui, come le TPMS, sia ai sistemi ricorsivi,

come le strutture frattali. La differenza tra continuità analitica e ricorsività iterativa si colloca a livello della funzione generativa, non della struttura implementativa.

Ciò che resta stabile è l'impalcatura operativa fondata su dominio volumetrico, valutazione del campo di densità ed estrazione di iso-superficie. Ciò che varia è invece la formulazione specifica che alimenta tale campo e l'assetto parametrico che ne controlla il comportamento. In questa prospettiva, la neutralità della procedura coincide con la capacità del core di mantenere invariata la propria architettura relazionale pur accogliendo istanze morfogenetiche differenti.

Componente	Invariante	Variabile
Pipeline generale	Funzione → campo scalare → iso-superficie	Forma risultante
Dominio di valutazione	Dominio volumetrico discreto	Estensione e risoluzione
Discretizzazione	Principio di campionamento numerico	Finezza del campionamento
Campo scalare	Livello intermedio stabile	Distribuzione dei valori
Estrazione della forma	Iso-valore / superficie di livello	Soglia, spessore, assetto sheet/lattice
Struttura algoritmica	Architettura node-based ricorrente	Modulo formula e parametri
Funzione generativa	Ruolo strutturale costante	TPMS, frattali, altre istanze
Parametrizzazione	Dispositivo generale di controllo	Numero, significato e intervallo dei parametri

Tabella 3.1

Componenti invarianti dello scaffold implementativo / componenti variabili delle singole istanze morfogenetiche

3.5.6 Implicazione strutturale

La procedura descritta costituisce, quindi, il protocollo tecnico che permette di gestire la morfologia come prodotto variabile di un modello basato su regole e dati interconnessi. Essa garantisce:

- separazione tra struttura implementativa e contenuto morfogenetico;
- invarianza del core sotto variazione parametrica;
- trasferibilità del sistema tra differenti famiglie morfogenetiche;
- coerenza tra formalizzazione matematica, valutazione numerica e rappresentazione geometrica.

In tal modo, la forma scaturisce dalla valutazione sistematica di una relazione implicita applicata ad uno spazio suddiviso in elementi minimi (pixel o voxel). Il nucleo della forma diventa così una architettura computazionale stabile, in grado di trasformare concetti astratti in geometrie concrete.

3.6 Parametrizzazione numerica e controllo dello spazio delle varianti

La formalizzazione del core morfogenetico come funzione implicita valutata su dominio tridimensionale discretizzato rende necessario esplicitare il ruolo della parametrizzazione numerica nel controllo della variazione morfologica. Se la struttura dell'algoritmo definisce la classe del sistema generativo, è attraverso i parametri che tale sistema attraversa lo spazio delle configurazioni possibili.

Nel presente lavoro, il parametro è inteso come variabile interna alla relazione generativa. Esso agisce all'interno della funzione definendo lo stato del sistema. La morfologia risultante scaturisce in modo immediato dalla variazione dello stato parametrico, configurandosi come il risultato diretto della logica interna al modello.

È necessario distinguere tra **Parametri Strutturali** e **Parametri Contingenti**. I primi intervengono nella definizione della relazione generativa e influenzano la configurazione morfologica in modo sistemico; i secondi incidono su aspetti secondari della rappresentazione o della discretizzazione numerica. Tale distinzione è essenziale per mantenere la separazione concettuale tra struttura dell'algoritmo e stato parametrico.

Lo spazio delle varianti può essere inteso come dominio continuo definito dall'insieme delle possibili combinazioni parametriche. Ogni punto di questo dominio corrisponde a uno stato morfologico coerente con la struttura generativa di base. La variazione parametrica esplora le configurazioni implicite nel sistema già formalizzato.

Un aspetto centrale è la continuità del dominio parametrico. In un sistema implicito parametrico correttamente definito, piccole variazioni numeriche producono trasformazioni morfologiche progressive e controllabili. L'assenza di discontinuità algoritmica garantisce che la forma evolva senza rotture strutturali finché non vengano raggiunte condizioni limite del sistema.

La sensibilità del sistema rispetto a variazioni incrementali costituisce un indicatore della sua stabilità interna. Un core morfogenetico robusto deve mantenere coerenza strutturale sotto variazione continua dei parametri, evitando transizioni non controllate tra configurazioni incompatibili. In tal senso, la parametrizzazione non è soltanto uno strumento di esplorazione formale, ma una condizione di verificabilità del sistema. La parametrizzazione costituisce dunque la potenzialità esplorativa controllata del sistema.

3.7 Invarianza strutturale dell'algoritmo rispetto alla variazione dei parametri

La distinzione tra struttura dell'algoritmo e stato parametrico, introdotta nel paragrafo precedente, consente ora di esplicitare il concetto di invarianza strutturale del core morfogenetico. Tale nozione costituisce uno dei presupposti teorici centrali dell'intero impianto della ricerca.

Per invarianza strutturale si intende la permanenza della struttura generativa del sistema sotto variazione continua dei parametri interni. La funzione che definisce la relazione morfogenetica mantiene la propria forma logica, mentre lo stato numerico dei parametri ne determina la configurazione contingente. La variazione non interviene sulla struttura dell'algoritmo, ma sul suo dominio di applicazione.

Questa proprietà consente di distinguere tra cambiamento morfologico e cambiamento strutturale. Il primo è continuo e controllabile; il secondo implica una riscrittura della regola generativa. L'invarianza strutturale non deve essere intesa come rigidità del sistema. Al contrario, essa rappresenta la condizione che rende possibile una variazione ampia e articolata senza perdita di identità. Un sistema privo di struttura invariabile non consentirebbe alcuna esplorazione controllata, poiché ogni variazione comporterebbe una ridefinizione completa della regola generativa.

Dal punto di vista epistemologico, questa impostazione rafforza l'idea della forma come stato relazionale e non come entità autonoma. L'oggetto morfologico non possiede identità indipendente dal

sistema che lo genera; la sua coerenza deriva dall'appartenenza a una classe definita da una relazione invariabile.

Nel contesto del capitolo, l'invarianza strutturale rappresenta la condizione che rende il core morfogenetico trasferibile tra differenti famiglie generative. Continuità analitica e ricorsività iterativa condividono la medesima architettura implementativa e la medesima distinzione tra struttura e stato parametrico. Ciò che cambia è la natura della relazione generativa, non la logica del sistema.

3.8 Condizioni di robustezza e trasferibilità del core morfogenetico

L'invarianza strutturale consente di introdurre una seconda proprietà fondamentale del core morfogenetico: la robustezza. Se l'identità del sistema è definita dalla permanenza della relazione generativa sotto variazione parametrica, è necessario verificare in quali condizioni tale permanenza possa essere mantenuta in modo stabile.

Per robustezza si intende la capacità del sistema di conservare coerenza morfologica e stabilità comportamentale sotto variazione controllata di parametri, scala e discretizzazione numerica. Un core robusto non produce configurazioni incoerenti o degenerative al variare delle condizioni operative, finché tali variazioni rimangono entro il dominio di validità della relazione generativa.

La robustezza si articola su più livelli.

- I. In primo luogo, riguarda la stabilità della valutazione implicita su griglia discreta. La discretizzazione introduce inevitabilmente un'approssimazione numerica; tuttavia, un sistema coerente deve mantenere riconoscibilità strutturale anche al variare della risoluzione della griglia. La morfologia può raffinarsi o semplificarsi, ma non deve perdere identità.
- II. In secondo luogo, la robustezza concerne la scalabilità del dominio. La variazione di scala spaziale deve alterare solo la dimensione delle configurazioni risultanti. La separazione tra funzione generativa e dominio di valutazione garantisce questa proprietà.
- III. In terzo luogo, la robustezza implica coerenza sotto variazione parametrica estrema. Esistono condizioni limite oltre le quali il sistema può degenerare — ad esempio attraverso collassi topologici o perdita di continuità numerica — ma tali condizioni devono essere identificabili come confini del dominio parametrico, non come instabilità intrinseche dell'algoritmo.

La nozione di trasferibilità deriva direttamente da questa proprietà. Un core robusto è trasferibile quando può essere implementato in ambienti computazionali differenti senza alterarne la struttura logica. La pipeline **funzione** → **campo scalare** → **iso-superficie** non è legata a un software specifico, ma costituisce un'architettura astratta replicabile in contesti diversi. La trasferibilità coincide con la permanenza della struttura sotto cambiamento di implementazione. Se la relazione generativa e la procedura operativa rimangono invariate, il sistema conserva identità indipendentemente dallo strumento utilizzato per la sua valutazione.

È tuttavia necessario riconoscere l'esistenza di condizioni limite. Un sistema può perdere coerenza quando:

- la discretizzazione è insufficiente a rappresentare adeguatamente la variazione della funzione;
- la variazione parametrica eccede il dominio di validità;
- la rappresentazione numerica introduce errori cumulativi non controllati.

Tali condizioni non invalidano il core, ma ne delimitano il campo di applicazione. La definizione esplicita dei limiti costituisce parte integrante della formalizzazione.

Framework

C-4 metodologico

Capitolo Quarto

Variazione parametrica,
vincoli operativi e
transizioni di regime

Sinossi del capitolo

C-4

CAPITOLO 4 – FRAMEWORK METODOLOGICO INTEGRATO

Il Capitolo 4 formalizza il framework metodologico della ricerca come sistema iterativo di co-evoluzione tra formalizzazione morfogenetica e sistema produttivo. Partendo dal core morfogenetico definito nel Capitolo 3, si introduce un loop decisionale strutturato — Algoritmo → Variazione parametrica → Verifica di producibilità — in cui la valutazione produttiva agisce come momento di retroazione attiva sul modello generativo implicito parametrico. La variazione numerica dei parametri costituisce il primo livello di adattamento della forma ai vincoli tecnologici. Nei casi di incompatibilità strutturale, il passaggio a un diverso regime produttivo permette di rimodulare il processo senza tuttavia alterare la matrice algoritmica stabilita in precedenza. Viene inoltre introdotta una gerarchia dei sistemi di fabbricazione (additivo diretto, sottrattivo diretto, indiretto), dimostrando come tale progressione abiliti la gestione di una complessità formale sempre maggiore. Il framework si configura dunque come una struttura dinamica in cui forma e processo si influenzano reciprocamente, configurando un modello di co-evoluzione tra algoritmo e produzione materiale.

Keywords

Variazione parametrica

Vincolo operativo

Retroazione progettuale

Regime di fabbricazione

Transizione di regime

Adattamento morfologico

4.1 Dalla formalizzazione algoritmica alla traducibilità materiale

La formalizzazione del biomorfismo computazionale sviluppata nel Capitolo 3 ha consentito di definire un core morfogenetico stabile, fondato sulla valutazione di funzioni implicite parametriche all'interno di un campo scalare volumetrico e sull'estrazione di superfici di livello tramite discretizzazione poligonale.

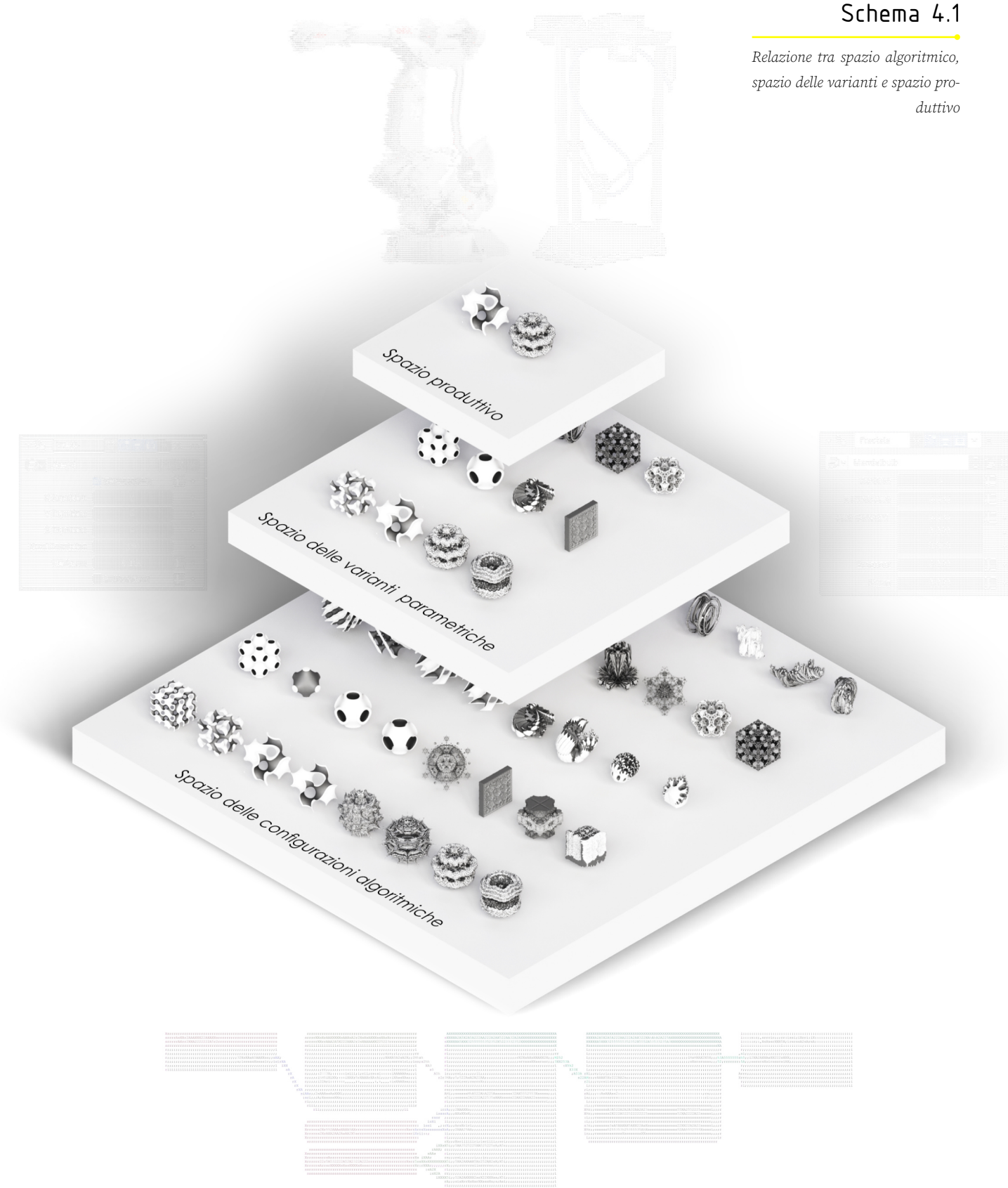
Tuttavia, la codifica algoritmica della morfologia non coincide automaticamente con la possibilità della sua materializzazione. La generazione computazionale può infatti produrre configurazioni geometriche la cui complessità eccede le capacità operative dei sistemi di fabbricazione disponibili. In questo senso, l'autonomia della generazione formale rappresenta al tempo stesso una condizione di libertà progettuale e una potenziale fonte di discontinuità tra il dominio algoritmico e quello materiale. La distanza tra ciò che è geometricamente descrivibile e ciò che è tecnicamente producibile costituisce dunque un problema metodologico centrale nel rapporto tra design computazionale e fabbricazione digitale.

Nel contesto della progettazione algoritmica, la generazione morfologica tende spesso a essere concepita come una fase preliminare e indipendente rispetto alla produzione, mentre la fabbricazione interviene successivamente come momento esecutivo volto a tradurre una forma già definita in oggetto fisico. Questa impostazione lineare presuppone una compatibilità implicita tra modelli generati e sistemi produttivi, o affida la risoluzione delle incongruenze a adattamenti locali della geometria. Tuttavia, quando si opera con modelli morfogenetici complessi — come nel caso delle superfici implicite continue o delle strutture ricorsive — tale presupposto si rivela spesso insufficiente. La relazione tra forma e produzione non può essere ridotta a un semplice problema di discretizzazione geometrica o di adattamento tecnico, ma richiede una considerazione più ampia delle condizioni operative entro cui la morfologia può essere effettivamente realizzata.

In questa prospettiva, la traducibilità materiale di una configurazione morfologica emerge dall'interazione tra la struttura formale generata e i vincoli operativi dei sistemi produttivi impiegati. Parametri come lo spessore minimo realizzabile, l'angolo massimo di oggetto, la continuità delle superfici o le condizioni di accessibilità degli utensili introducono limiti che agiscono direttamente sulla possibilità di materializzare una determinata configurazione geometrica. Tali vincoli operano come fattori di selezione che riducono lo spazio

Schema 4.1

Relazione tra spazio algoritmico, spazio delle varianti e spazio produttivo



delle configurazioni effettivamente producibili all'interno dell'insieme più ampio delle forme teoricamente generabili.

Il primo corrisponde all'insieme delle configurazioni geometriche ottenibili attraverso la variazione dei parametri dell'algoritmo generativo; il secondo è costituito dal sottoinsieme di tali configurazioni che risultano compatibili con le condizioni operative di uno specifico regime di fabbricazione. La relazione tra questi due spazi non è statica né universalmente definita, ma dipende dal sistema tecnologico considerato, dalle proprietà dei materiali e dalle modalità operative dei processi produttivi impiegati. In altre parole, una configurazione morfologica può risultare producibile in un determinato contesto tecnologico e non esserlo in un altro.

La questione della traducibilità materiale introduce una dimensione operativa che interviene nella definizione stessa dello spazio delle forme. La producibilità agisce infatti come una condizione che contribuisce a strutturare il campo delle configurazioni morfologiche effettivamente esplorabili all'interno del processo progettuale. In quest'ottica, la produzione si configura come una componente intrinseca alla generazione formale, partecipando attivamente alla determinazione delle condizioni di possibilità della morfologia

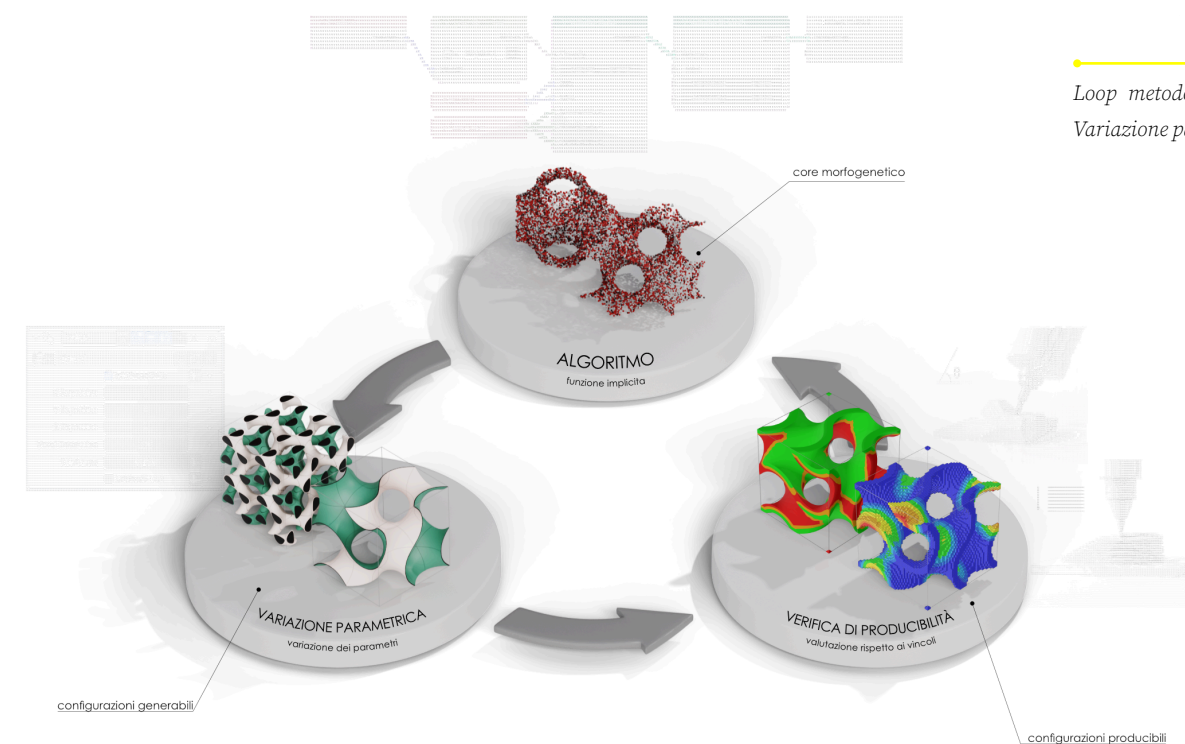
Alla luce di queste considerazioni, si delinea la necessità di un framework metodologico integrato capace di articolare in modo esplicito la relazione tra formalizzazione algoritmica e produzione materiale. Tale framework deve consentire di mettere in relazione il core morfogenetico definito nel Capitolo 3 con i vincoli operativi dei sistemi di fabbricazione, trasformando la verifica di producibilità in un momento attivo del processo progettuale. In questa prospettiva, la forma algoritmica e il processo produttivo agiscono come componenti interdipendenti di un sistema dinamico, in cui la configurazione strutturale emerge dalla sintesi tra generazione computazionale e condizioni materiali di realizzazione

4.2 Definizione del loop metodologico Algoritmo → Variazione → Producibilità

Se la formalizzazione descritta nel capitolo precedente consente di generare una molteplicità di configurazioni morfologiche agendo sui parametri che governano il comportamento della funzione implicita, resta aperta la questione della loro effettiva traducibilità materiale all'interno di uno specifico sistema produttivo. La discrepanza tra l'astrazione dello spazio morfologico e i vincoli della produzione impone, dunque, un dispositivo metodologico capace di articolare in modo operativo la relazione tra generazione algoritmica e verifica della producibilità.

In questa prospettiva, il processo progettuale non può essere interpretato come una sequenza lineare che procede dalla definizione della forma alla sua successiva realizzazione materiale. Piuttosto, la generazione formale e la produzione devono essere considerate come momenti interdipendenti di un sistema iterativo in cui le configurazioni morfologiche vengono progressivamente valutate e adattate alla luce delle condizioni operative della fabbricazione. Il passaggio da un modello puramente generativo a un processo progettuale orientato alla materializzazione richiede dunque l'introduzione di una struttura decisionale capace di collegare esplicitamente le operazioni algoritmiche con le condizioni di producibilità.

Il framework metodologico proposto nella ricerca assume quindi la forma di un **loop iterativo** che connette tre operazioni fondamentali: la generazione algoritmica della morfologia, la variazione parametrica delle geometrie e la verifica della loro producibilità all'interno di un determinato regime di fabbricazione. In questa struttura, l'algoritmo definisce il dominio formale entro cui vengono generate le configurazioni morfologiche; la variazione parametrica consente di esplorare lo spazio delle varianti; la verifica di producibilità valuta infine la compatibilità tra tali configurazioni e i vincoli tecnologici del processo produttivo.



Schema 4.2

Loop metodologico Algoritmo →
Variazione parametrica → Verifica
di producibilità

Proseguendo nell'analisi del loop, è possibile osservare come ciascuna delle tre operazioni svolga un ruolo distinto ma interdipendente all'interno del processo progettuale. L'**Algoritmo** rappresenta la componente generativa del sistema e definisce il modello matematico che governa la formazione della morfologia. Attraverso la valutazione della funzione implicita e l'estrazione della superficie di livello, il core morfogenetico produce configurazioni geometriche appartenenti alla stessa famiglia formale ma differenziate dai valori assunti dai parametri numerici.

La **variazione parametrica** costituisce il primo livello di adattamento tra modello generativo e condizioni operative della produzione. Modificando i parametri che controllano la funzione implicita o la discretizzazione del campo scalare, è possibile ottenere configurazioni morfologiche differenti. La parametrizzazione consente quindi di esplorare sistematicamente lo spazio delle varianti, individuando configurazioni geometriche che possano risultare compatibili con i vincoli produttivi.

La **verifica di producibilità** introduce infine la dimensione materiale del processo. In questa fase, le configurazioni generate vengono valutate alla luce delle condizioni operative del regime di fabbricazione considerato.

Il risultato di questa verifica non conclude il processo progettuale, ma genera una **retroazione** che interviene direttamente sull'esplorazione dello spazio delle varianti. Qualora una configurazione risulti incompatibile con i vincoli produttivi, il sistema ritorna alla fase di variazione parametrica, modificando i valori dei parametri per individuare configurazioni alternative potenzialmente producibili. In questo modo, la produzione non opera come semplice fase finale di realizzazione, ma come dispositivo di valutazione che orienta l'evoluzione del processo progettuale.

Il loop **Algoritmo** → **Variazione parametrica** → **Verifica di producibilità** può quindi essere interpretato come un **dispositivo metodologico** che rende esplicita la relazione tra generazione computazionale e materializzazione fisica. La morfologia algoritmica viene progressivamente adattata alle condizioni operative della fabbricazione attraverso un processo di esplorazione parametrica e verifica produttiva.

4.3 Variazione parametrica come primo livello di adattamento

All'interno del framework metodologico definito nel paragrafo precedente, la **variazione parametrica** rappresenta il primo livello di adattamento attraverso cui la morfologia algoritmica può essere

messa in relazione con i vincoli operativi dei sistemi produttivi. La parametrizzazione consente quindi di esplorare lo spazio delle forme senza intervenire sulla definizione matematica del modello generativo.

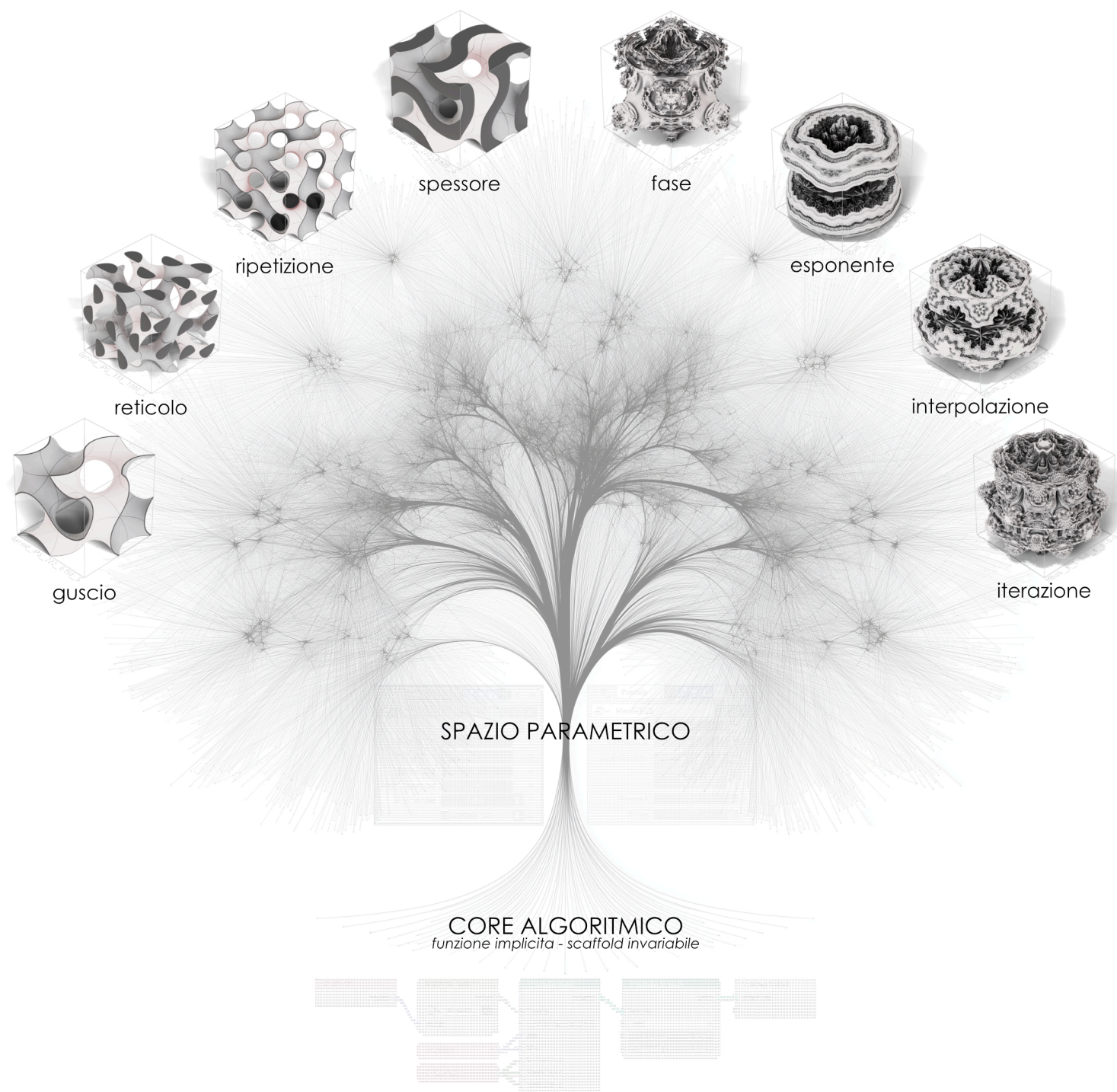
Nel caso dei modelli morfogenetici formalizzati nel Capitolo 3, i parametri agiscono come **coordinate dello spazio morfologico**, determinando la configurazione geometrica delle superfici generate a partire dalla stessa funzione implicita. In questo modo, una singola struttura algoritmica è in grado di produrre una famiglia continua di configurazioni morfologiche appartenenti alla stessa classe formale ma differenziate per caratteristiche geometriche quali densità, spessore, periodicità o grado di articolazione spaziale.

La parametrizzazione introduce un controllo sistematico sullo spazio degli esiti generabili, dove ogni variazione nei valori determina una specifica configurazione morfologica. L'insieme delle possibili combinazioni definisce il dominio di una famiglia generativa all'interno della quale l'atto progettuale si sposta dalla definizione di una singola forma all'esplorazione di uno **spazio parametrico**, mantenendo invariata la logica algoritmica sottostante.

La parametrizzazione può essere interpretata come uno strumento di **mediazione tra spazio morfologico e spazio produttivo**. La variazione dei parametri consente infatti di modificare alcune proprietà geometriche della configurazione generata — come dimensioni caratteristiche, curvature locali o distribuzione spaziale delle superfici — senza alterare la struttura matematica del modello. Ciò rende possibile individuare configurazioni morfologiche che soddisfano simultaneamente le condizioni formali definite dall'algoritmo e i requisiti tecnici imposti dal processo produttivo.

Nonostante questa capacità di adattamento, la variazione parametrica presenta tuttavia dei limiti intrinseci. Poiché i parametri operano all'interno della struttura definita dall'algoritmo generativo, essi possono modificare le configurazioni geometriche solo entro i confini della famiglia morfogenetica definita dal modello. Quando l'incompatibilità tra configurazione morfologica e sistema produttivo deriva da caratteristiche strutturali più profonde della geometria — come l'organizzazione topologica della forma o la distribuzione spaziale delle superfici — la semplice modifica dei parametri può non essere sufficiente a rendere la configurazione producibile.

In tali condizioni, il processo progettuale richiede un livello di intervento differente, che non opera più sulla variazione delle configurazioni all'interno della stessa struttura generativa, ma sulla ridefinizione delle condizioni operative della produzione stessa. Questo passaggio introduce la necessità di considerare i vincoli tecnologici come un filtro che seleziona le configurazioni producibili e, nei casi



Schema 4.3

Relazione tra spazio parametrico e varianti morfologiche

di incompatibilità strutturale, di esplorare strategie alternative basate sul cambiamento del regime produttivo.

4.4 Filtro geometrico-produttivo e natura dei vincoli tecnologici

All'interno del loop metodologico precedentemente definito, la verifica di producibilità richiede uno strumento analitico capace di va-

lutare la compatibilità tra le configurazioni morfologiche generate e le condizioni operative dei sistemi di fabbricazione. A questo scopo viene introdotto il concetto di **filtro geometrico-produttivo**, inteso come dispositivo interpretativo che consente di analizzare come i vincoli tecnologici intervengano nella selezione delle configurazioni morfologiche effettivamente realizzabili.

È quindi utile distinguere tra **vincoli geometrici** e **vincoli tecnologici**. I primi riguardano proprietà intrinseche della configurazione morfologica, mentre i secondi derivano dalle caratteristiche operative del processo produttivo. Nel momento in cui una configurazione generata dall'algoritmo viene valutata rispetto a un determinato regime di fabbricazione, questi due insiemi di condizioni entrano in relazione, determinando se la geometria possa essere materializzata senza compromettere la stabilità del processo o l'integrità del manufatto.

Il filtro geometrico-produttivo può quindi essere interpretato come un **operatore di selezione** che agisce sullo spazio delle configurazioni generate dal modello morfogenetico.

In termini concettuali, il filtro riceve in ingresso l'insieme delle varianti geometriche ottenute attraverso la variazione parametrica e restituisce in uscita il sottoinsieme delle configurazioni compatibili con i vincoli del processo produttivo considerato. Questo passaggio introduce una valutazione che opera a livello di relazione tra morfologia e processo.

L'introduzione del filtro geometrico-produttivo consente quindi di esplicitare il meccanismo attraverso cui la produzione interviene nel processo generativo. I vincoli tecnologici agiscono come criteri operativi che definiscono le condizioni di compatibilità tra forma e processo. In questo senso, il sistema produttivo contribuisce attivamente alla definizione dello spazio delle configurazioni realizzabili.

Il risultato dell'applicazione del filtro è la **riduzione dello spazio delle varianti** a un insieme più ristretto di configurazioni producibili. Questo insieme non coincide necessariamente con una singola soluzione, ma può comprendere più esiti geometrici che soddisfano simultaneamente i requisiti morfologici del modello generativo e i vincoli tecnologici del processo produttivo. La selezione finale tra queste configurazioni dipende quindi da ulteriori criteri progettuali, come prestazioni strutturali, efficienza materiale o qualità spaziale.

Qualora nessuna configurazione appartenente allo spazio parametrico risulti compatibile con i vincoli del processo produttivo, il filtro evidenzia una condizione di **non-producibilità**. In questo caso il sistema iterativo definito dal loop metodologico richiede un ulteriore livello di decisione progettuale, che può comportare una nuo-

SPAZIO DELLE VARIANTI

va esplorazione dello spazio parametrico oppure la ridefinizione delle condizioni operative della fabbricazione.

4.5 Condizione di non-producibilità e iterazione decisionale

L'applicazione del filtro geometrico-produttivo introduce una possibilità strutturale all'interno del processo progettuale: l'incompatibilità tra la configurazione morfologica generata dal modello algoritmico e i vincoli tecnologici del processo produttivo. In tali casi si verifica una condizione di **non-producibilità**, in cui la geometria generata non può essere materializzata senza violare le condizioni operative della fabbricazione. Questa eventualità non rappresenta un'anomalia del processo progettuale, ma costituisce al contrario una componente fondamentale della dinamica iterativa che caratterizza il framework metodologico proposto.

La condizione di non-producibilità attiva quindi una fase di **iterazione decisionale** nel loop metodologico. Poiché l'esito generato non soddisfa i requisiti produttivi, il processo progettuale devia dalla materializzazione immediata verso una fase di riformulazione, volta a individuare morfologie compatibili con le logiche del processo produttivo.

Il primo livello di intervento consiste generalmente nella **iterazione parametrica**. Agendo sulle variabili che governano il modello morfogenetico è possibile generare nuove configurazioni geometriche appartenenti alla stessa famiglia formale. Questa operazione consente di esplorare ulteriori regioni dello spazio parametrico alla ri-

cerca di configurazioni che soddisfino simultaneamente le condizioni morfologiche definite dall'algoritmo e i vincoli tecnologici imposti dal processo produttivo. In molti casi, la regolazione dei parametri — ad esempio attraverso la variazione delle dimensioni caratteristiche, delle periodicità o delle densità geometriche — è sufficiente a rendere producibile una configurazione che inizialmente risultava incompatibile con il processo.

Tuttavia, la variazione parametrica non è sempre risolutiva.

Quando l'incompatibilità deriva da caratteristiche

che strutturali più profonde

della geometria generata, l'esplora-

zione dello spazio parametrico può risul-

tare insufficiente. In queste situazioni la non-

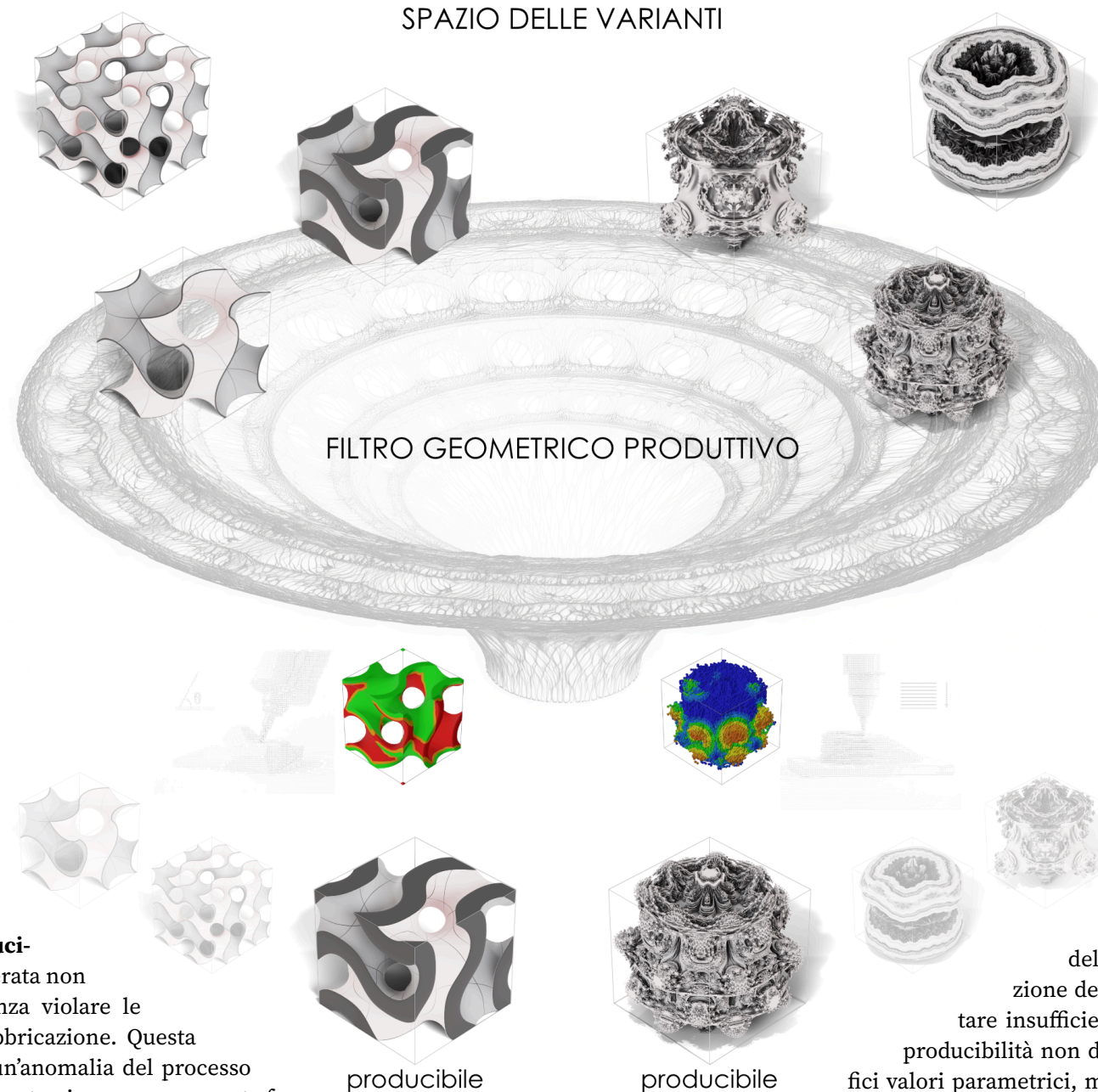
producibilità non dipende semplicemente da speci-

fici valori parametrici, ma dalla relazione tra la struttura

morfologica della configurazione e il regime produttivo adottato.

In altre parole, delle morfologie generabili dall'algoritmo può risultare complessivamente incompatibile con le condizioni operative del processo produttivo considerato.

La presenza di questa eventualità introduce una **dimensione decisionale** all'interno del framework metodologico. Il progettista è chiamato a un bivio metodologico tra il proseguimento dell'ottimizzazione algoritmica o l'intervento diretto sul sistema produttivo, ridefinendo le condizioni stesse della fabbricazione. L'iterazione diventa così la **dinamica operativa fondamentale del framework**. Il processo progettuale assume la forma di una sequenza di generazioni, verifiche e riformulazioni attraverso cui la morfologia algoritmica viene progressivamente adattata alle condizioni materiali della produzione. Ogni ciclo di iterazione consente di restringere ul-



Schema 4.4

Filtro geometrico-produttivo e selezione delle configurazioni producibili

teriormente lo spazio delle configurazioni candidate, orientando l'esplorazione verso soluzioni che soddisfino simultaneamente i requisiti morfologici del modello generativo e i vincoli tecnologici del sistema produttivo.

4.6 Passaggio di regime produttivo come strategia strutturale

Quando la condizione di non-producibilità non può essere risolta attraverso l'iterazione parametrica, il processo progettuale richiede un livello di intervento differente. In queste situazioni, l'incompatibilità tra configurazione morfologica e sistema produttivo dipende dal rapporto strutturale tra la logica geometrica della forma e le condizioni operative del processo di fabbricazione adottato. Ciò implica che l'intero insieme delle configurazioni generabili all'interno dello spazio parametrico risulti incompatibile con i vincoli del regime produttivo considerato.

Ciò rende necessario introdurre una strategia metodologica che non agisca più sulla configurazione geometrica della forma, ma sulle condizioni operative della sua materializzazione. A questo scopo viene formalizzato il **passaggio di regime produttivo** come dispositivo strategico che consente di superare i limiti di producibilità senza intervenire sul core algoritmico che governa la generazione morfogenetica.

Ogni sistema di fabbricazione digitale è infatti caratterizzato da un insieme specifico di vincoli operativi che definiscono il dominio delle geometrie realizzabili derivanti dalla fisica del processo, dalle proprietà dei materiali e dalle modalità operative delle macchine impiegate. Di conseguenza, ciascun regime produttivo delimita uno specifico **campo operativo della morfologia**, all'interno del quale alcune configurazioni risultano producibili mentre altre rimangono incompatibili con le condizioni di fabbricazione.

Il passaggio a un differente regime produttivo comporta quindi una ridefinizione di questo campo operativo in cui cambiando il processo di fabbricazione, cambiano anche i vincoli tecnologici che agiscono come filtro sulla morfologia generata dall'algoritmo. La non-producibilità di una configurazione viene così riassorbita dalle diverse capacità operative di un nuovo sistema di produzione.

Il passaggio di regime produttivo può quindi essere interpretato come una strategia che **ridefinisce la relazione tra forma e processo** senza intervenire sulla struttura del modello generativo. Questa prospettiva introduce una logica **multi-regime** nella relazione tra generazione algoritmica e produzione materiale. L'esplorazione di questi regimi consente di individuare il contesto produttivo più

adatto alla materializzazione della morfologia generata dall'algoritmo.

L'introduzione di una strategia multi-regime costituisce quindi un passaggio concettuale fondamentale. La complessità morfogenetica trattabile eccede la semplice capacità generativa dell'algoritmo, trovando la sua effettiva attuazione nella possibilità di selezionare o ridefinire il regime produttivo entro cui la morfologia viene materializzata.

4.7 Gerarchia dei regimi di fabbricazione

L'introduzione del passaggio di regime produttivo come strategia metodologica rende necessario definire con maggiore precisione le caratteristiche dei sistemi di fabbricazione che possono essere impiegati nella materializzazione delle morfologie generate dall'algoritmo. I processi di fabbricazione digitale includono un insieme eterogeneo di tecnologie e presentano condizioni operative differenti che influenzano in modo significativo il tipo di configurazioni morfologiche realizzabili.

Nell'approccio qui delineato, è quindi utile organizzare i processi produttivi in una **gerarchia di regimi di fabbricazione**, definita sulla base della relazione che ciascun processo stabilisce tra generazione geometrica e materializzazione fisica. Questa classificazione consente di analizzare il diverso grado di libertà morfologica che ciascun regime consente rispetto alle configurazioni generate dal modello morfogenetico.

Il primo livello della gerarchia è costituito dal **regime additivo diretto**, in cui la concretizzazione avviene attraverso la deposizione progressiva di materiale secondo una traiettoria controllata digitalmente. In questo regime, la forma finale emerge dalla sovrapposizione di strati o cordoni di materiale depositati direttamente nello spazio tridimensionale. Il processo consente una relazione relativamente diretta tra modello digitale e oggetto fisico, ma introduce specifici vincoli legati alla stabilità della deposizione, alla continuità delle traiettorie e alle condizioni di supporto delle superfici durante la fabbricazione. Tali vincoli possono limitare la realizzabilità di configurazioni caratterizzate da forti aggetti, discontinuità geometriche o geometrie sospese prive di supporto.

Il secondo livello è rappresentato dal **regime sottrattivo diretto**, in cui la forma viene ottenuta attraverso la rimozione controllata di materiale da un blocco iniziale mediante utensili di lavorazione. In questo caso, la geometria finale emerge dal processo di fresatura o taglio che progressivamente elimina porzioni di materiale fino a

raggiungere la configurazione desiderata. Questo regime introduce vincoli differenti rispetto alla fabbricazione additiva, legati principalmente all'accessibilità degli utensili e alle traiettorie di lavorazione. Geometrie caratterizzate da cavità profonde, sottosquadri o configurazioni interne non accessibili possono risultare difficili o impossibili da realizzare attraverso processi sottrattivi diretti.

Il terzo livello è costituito dal **regime indiretto tramite cassaforma**, in cui la geometria non viene prodotta direttamente dal processo di fabbricazione digitale, ma emerge attraverso un passaggio intermedio di formatura. In questo regime, la fabbricazione digitale viene impiegata per produrre una struttura di supporto — ad esempio una cassaforma o uno stampo — all'interno della quale il materiale finale viene successivamente colato o modellato. Questo approccio consente di superare alcuni dei limiti imposti dai processi additivi o sottrattivi diretti, poiché la forma finale dipende dalla geometria dello stampo che definisce il volume della materializzazione.

La distinzione tra questi tre regimi non riguarda soltanto la tecnologia utilizzata, ma il modo in cui il processo produttivo media la relazione tra modello digitale e configurazione materiale. Ciascun regime introduce un insieme specifico di vincoli tecnologici e, di conseguenza, definisce un diverso **dominio di libertà morfologica** all'interno del quale le configurazioni generate dall'algoritmo possono essere materializzate.

In questa prospettiva, la gerarchia dei regimi di fabbricazione si configura come una struttura che organizza le diverse condizioni operative della produzione rispetto alla complessità geometrica delle configurazioni morfologiche. I regimi additivi diretti consentono una relazione immediata tra modello digitale e oggetto fisico, ma possono risultare limitati da condizioni di stabilità del processo.

Questa gerarchia costituisce un elemento strutturale del framework: organizzare i regimi produttivi secondo il loro grado di libertà morfologica consente infatti di individuare strategie operative per superare le condizioni di non-producibilità evidenziate dal filtro geometrico-produttivo. Il passaggio da un regime a un altro ridefinisce, quindi, le condizioni operative entro cui la morfologia generata dall'algoritmo può essere materializzata.

4.8 Progressione della complessità morfogenetica trattabile

La definizione di una gerarchia dei regimi di fabbricazione consente di introdurre una considerazione più generale sul rapporto tra generazione algoritmica e produzione materiale. La possibilità di materializzare configurazioni morfologiche complesse dipende dal

modo in cui il sistema produttivo è in grado di interagire con le strutture geometriche generate dal modello morfogenetico. In questo senso, la complessità morfologica effettivamente trattabile all'interno del processo progettuale emerge dall'interazione tra spazio parametrico e condizioni operative della fabbricazione.

Il core algoritmico formalizzato nel Capitolo 3 definisce una famiglia di configurazioni potenzialmente molto ampia, all'interno della quale la variazione parametrica consente di esplorare differenti configurazioni geometriche appartenenti alla stessa logica morfogenetica. Tuttavia, la possibilità di trasformare queste configurazioni in oggetti materiali dipende dalla compatibilità tra le proprietà geometriche della morfologia e i vincoli tecnologici dei processi produttivi impiegati. In altre parole, la complessità geometrica generabile dall'algoritmo eccede spesso la complessità effettivamente producibile all'interno di uno specifico regime di fabbricazione.

La gerarchia dei regimi produttivi imprime una dinamica evolutiva al rapporto tra forma e processo. Questa dinamica produce una **progressiva espansione dello spazio delle forme producibili**. Man mano che il sistema progettuale integra regimi produttivi caratterizzati da differenti condizioni operative, aumenta il numero di configurazioni morfologiche che possono essere effettivamente materializzate. L'espansione deriva quindi dalla capacità del sistema produttivo di adattarsi alle caratteristiche della morfologia generata.

La complessità morfogenetica trattabile può essere interpretata come il risultato di un processo di **co-evoluzione tra forma e processo** che costituisce il principio cardine della ricerca. Da questa prospettiva emerge una implicazione più ampia per il design computazionale. L'espansione della complessità geometrica trattabile dipende dalla capacità di integrare in modo sistematico la dimensione produttiva all'interno del processo progettuale. La produzione cessa di essere una mera fase esecutiva per assumere il ruolo di componente attiva che contribuisce a definire le condizioni operative entro cui la morfologia algoritmica può essere materializzata.

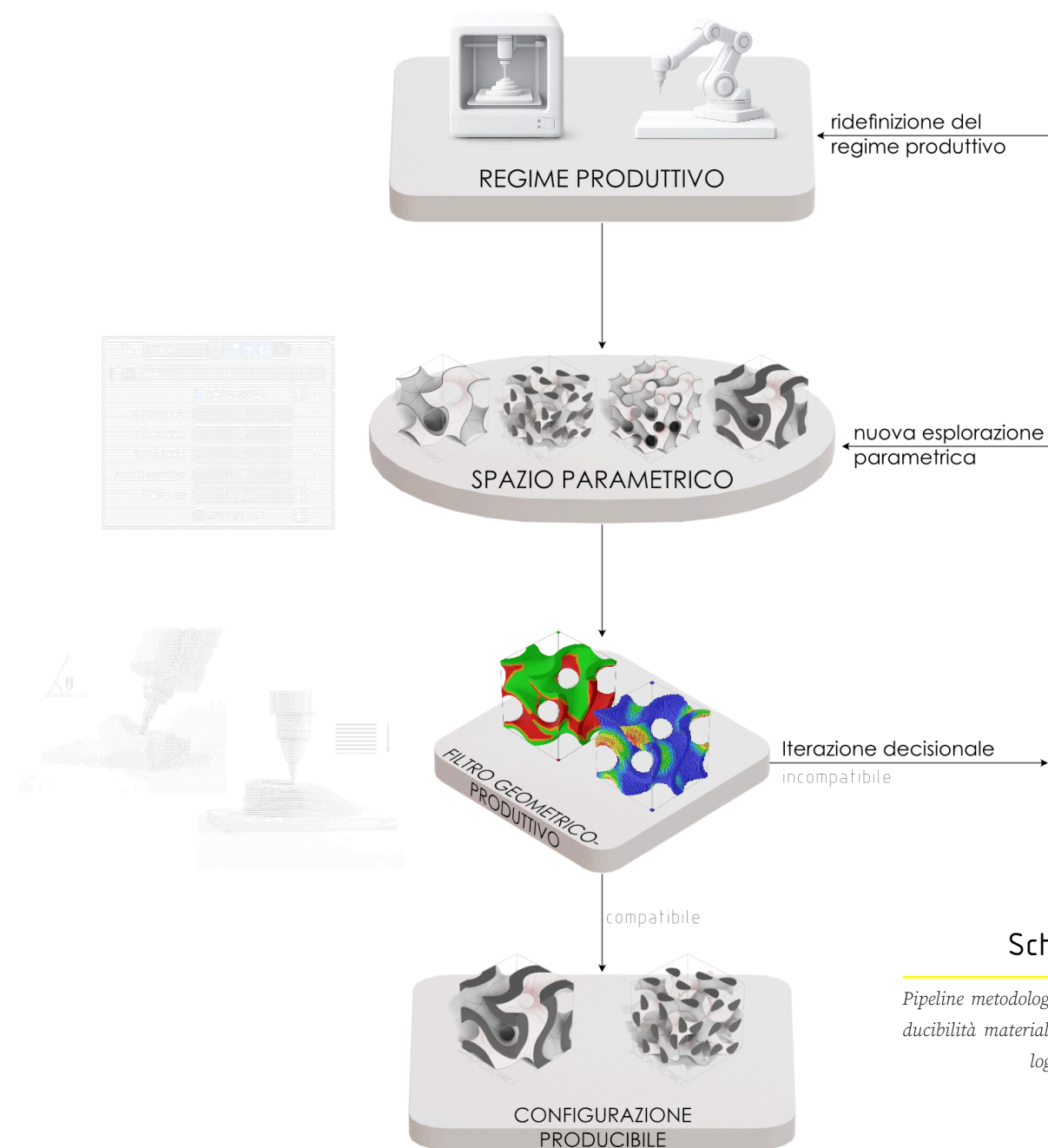
4.9 Struttura generale della pipeline operativa

I paragrafi precedenti hanno progressivamente definito i componenti fondamentali del framework metodologico: la formalizzazione algoritmica del modello morfogenetico, l'esplorazione dello spazio parametrico, la valutazione di producibilità attraverso il filtro geometrico-produttivo e la possibilità di ridefinire il regime di fabbricazione quando le configurazioni generate risultano incompatibili con i vincoli tecnologici del processo produttivo. A questo punto è possibile ricomporre questi elementi in una **pipeline operativa**

unitaria, che descrive la sequenza attraverso cui la morfologia algoritmica viene progressivamente tradotta in configurazione materiale.

Il processo prende avvio dal **core algoritmico** formalizzato nel Capitolo 3, che definisce il modello generativo alla base della produzione morfogenetica; il secondo livello è rappresentato dallo **spazio parametrico**, all'interno del quale il modello generativo può produrre una molteplicità di configurazioni geometriche attraverso la variazione dei parametri che governano il comportamento della funzione implicita; le configurazioni generate attraverso la variazione parametrica vengono quindi sottoposte alla **valutazione del filtro geometrico-produttivo**, che analizza la compatibilità tra le proprietà geometriche della morfologia e i vincoli tecnologici del processo di fabbricazione considerato; quando una configurazione soddisfa le condizioni di producibilità, la pipeline può procedere verso la materializzazione della forma. Nei casi in cui invece la configurazione generata risulti incompatibile con i vincoli del processo produttivo, il sistema attiva una fase di **iterazione decisionale**. Questa iterazione può operare su due livelli differenti: da un lato attraverso una nuova esplorazione dello spazio parametrico, che consente di generare configurazioni alternative all'interno della stessa famiglia morfogenetica; dall'altro attraverso la ridefinizione del regime di fabbricazione, che modifica le condizioni operative entro cui la morfologia viene valutata e materializzata.

L'iter assume quindi forma di un sistema dinamico caratterizzato da cicli iterativi tra generazione, valutazione e riformulazione. In questo modo, la morfologia finale non è determinata esclusivamente dal modello generativo né imposta dai vincoli tecnologici della produzione, ma emerge dalla **interazione iterativa tra forma computazionale e processo produttivo**.



Schema 4.5

Pipeline metodologica per la traducibilità materiale della morfologia algoritmica

Validazione del framework

Capitolo Quinto

Dal modello generativo
alla verifica prototipale

Sinossi del capitolo

C-5

CAPITOLO 5 – VALIDAZIONE PROGRESSIVA DEL FRAMEWORK

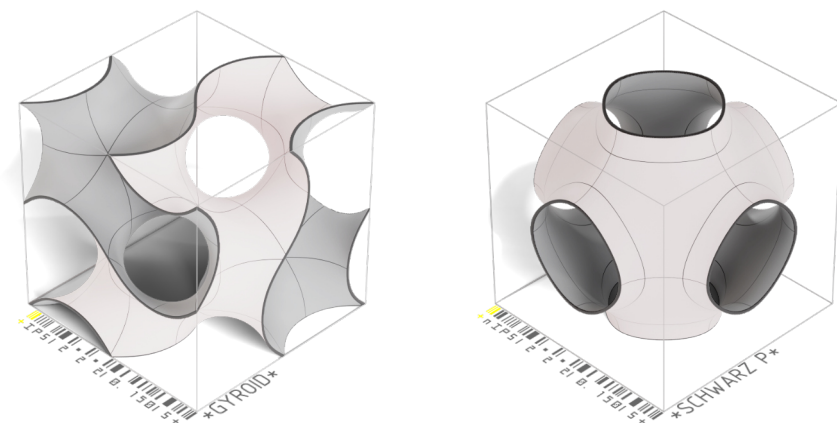
Il Capitolo 5 dimostra empiricamente il modello di co-evoluzione tra forma algoritmica e processo produttivo formalizzato nel Capitolo 4 attraverso una sequenza strutturata di casi studio che attraversano famiglie morfogenetiche differenti, scale dimensionali e regimi di fabbricazione progressivamente più articolati. Applicando il loop Algoritmo → Variazione parametrica → Verifica di producibilità, ciascun caso evidenzia come la forma non venga semplicemente adattata alla produzione, ma evolva insieme al sistema tecnologico che la rende realizzabile. Quando la variazione parametrica risulta insufficiente, il passaggio a un diverso regime produttivo rappresenta una ridefinizione del campo operativo entro cui la morfologia può esprimersi. Il capitolo mostra così che la traducibilità materiale della complessità morfogenetica dipende dall'interazione dinamica tra modello implicito parametrico e sistema produttivo, rendendo possibile l'estensione del modello a famiglie morfogenetiche caratterizzate da livelli di complessità strutturale differenti.

Keywords

Casi studio
Prototipazione
sperimentale
Validazione materiale
Processi additivi
Processi sottrattivi
Cassaforma solubile

Figura 5.1

Tavola sintetica delle famiglie TPMS considerate nella fase di generazione dei moduli

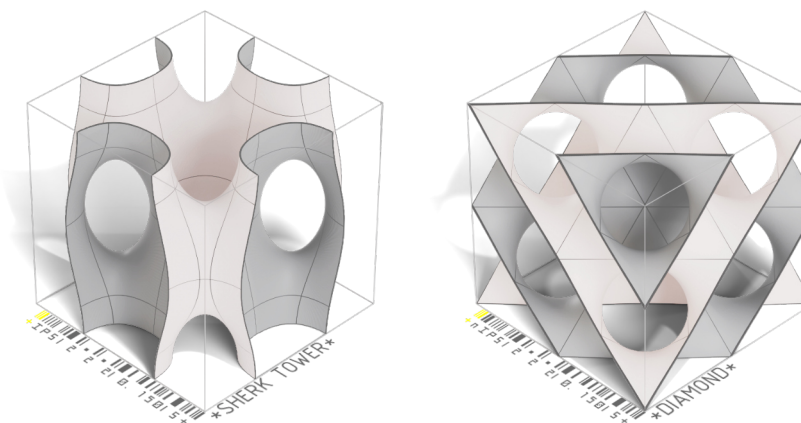


5.1 Applicazione del core algoritmico alle TPMS: generazione dei moduli

5.1.1 Le TPMS come prima classe di applicazione del core

La prima applicazione del core algoritmico invariabile è condotta sulla famiglia delle **Triply Periodic Minimal Surfaces** (TPMS), assunte come prima classe morfogenetica della ricerca perché consentono di mettere in relazione in modo particolarmente leggibile periodicità, continuità della superficie e costruzione di vuoti interni controllati. In termini metodologici, le TPMS costituiscono un terreno favorevole per la validazione iniziale del framework: da un lato permettono di lavorare su geometrie generate da relazioni implicite continue; dall'altro producono configurazioni spaziali già immediatamente rilevanti per la costruzione di moduli cellulari e porosi. La loro adozione risponde, quindi, alla necessità di verificare il comportamento del core su una famiglia di superfici in cui la morfologia emerge direttamente dall'organizzazione del campo nello spazio, senza ricorso a modellazione esplicita della mesh.

L'applicazione del core alle TPMS non è limitata a una singola superficie, ma si apre fin dall'inizio a una pluralità di famiglie. Il sistema viene infatti predisposto per generare moduli a partire da diverse formulazioni implicite, così da costruire uno spazio iniziale di configurazioni confrontabili entro la medesima architettura computazionale. In questa cornice, il **Giroide** viene assunto come caso di riferimento nel presente paragrafo perché consente di esplicitare con particolare chiarezza il passaggio dalla funzione implicita all'impalcatura implementativa node-based. Il suo ruolo è quindi espositivo e metodologico: attraverso il Giroide il core può essere descritto con precisione, mentre le altre superfici restano necessarie per mostrare che il sistema non coincide con una sola morfologia ma con una classe più ampia di configurazioni generabili.



5.1.2 Formulazione implicita del giroide e contenuto morfogenetico del caso

All'interno della famiglia TPMS, il giroide viene assunto come "il giroide è assunto come caso guida per declinare le potenzialità del modello. La sua formulazione implicita può essere espressa come

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0$$

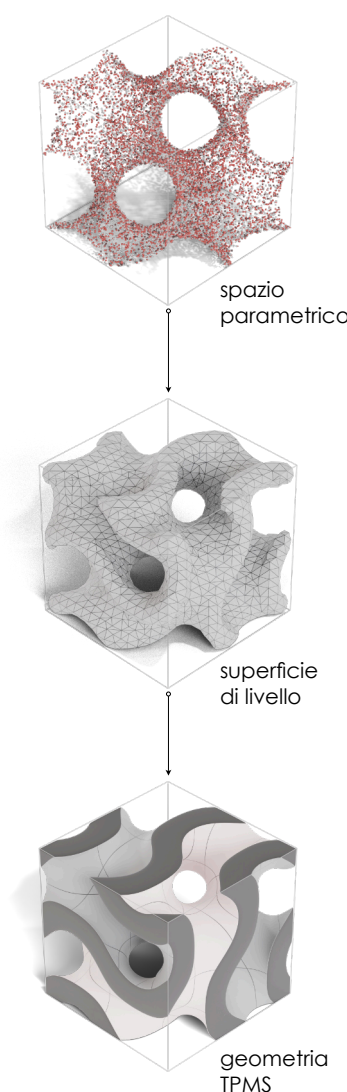
Equazione 5.1 – formulazione implicita del giroide

e descrive una superficie periodica nelle tre direzioni spaziali, continua e priva di intersezioni proprie. Il punto decisivo, ai fini del presente paragrafo, è che la geometria del modulo non deriva da un'operazione di modellazione diretta, ma dalla valutazione di una relazione matematica continua in tre variabili. La superficie esiste quindi dapprima come struttura implicita del campo e soltanto in un secondo momento come geometria discretizzata.

Questa distinzione è essenziale per comprendere il ruolo del core. Il giroide viene introdotto come funzione che definisce un comportamento spaziale: periodicità, distribuzione dei vuoti e continuità della superficie sono proprietà che appartengono alla relazione implicita prima ancora che alla mesh risultante.

5.1.3 Traduzione della funzione nel sistema implementativo di Geometry Nodes

La funzione definita nel paragrafo 5.1.2 entra nello sistema implementativo a partire dal campo delle coordinate spaziali. Nel setup, il nodo **Position** fornisce le coordinate del dominio, mentre un nodo **Multiply** applicato al vettore posizione ne trasforma i valori prima della valutazione trigonometrica. Questo passaggio controlla la **frequenza spaziale** nel dominio considerato e, di conseguenza, il numero di ripetizioni della cella TPMS entro il volume del modulo. Le tre componenti vengono quindi separate tramite **Separate XYZ** e inviate al gruppo che implementa la funzione: il risultato non è ancora una mesh, ma un **campo scalare implicito** valutato punto per punto nello spazio.



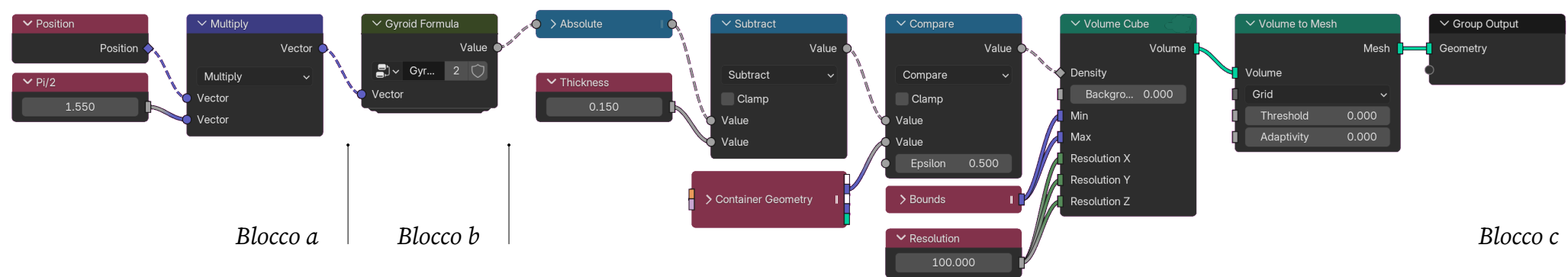
Schema 5.1

Visualizzazione del giroide come superficie di livello derivata da una funzione implicita periodica

Schema 5.2 a-b

Sequenza operativa completa del setup, dal campo implicito alla mesh del modulo

Blocco a) Position → Multiply → Separate XYZ → nodegroup della funzione implicita



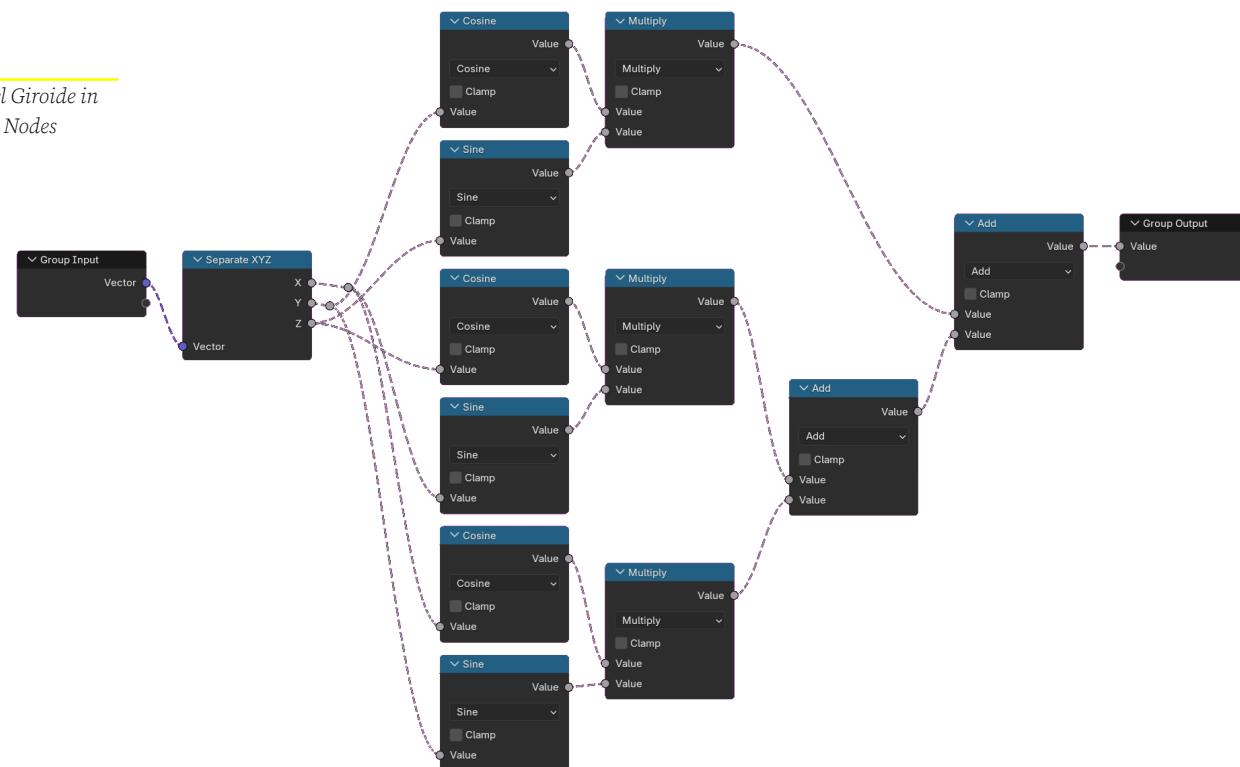
Schema 5.1 c

Blocco c) Absolute → Subtract → Raycast/Hit Distance → Compare, con evidenza del criterio di contenimento

L'uscita del gruppo funzionale viene poi trasformata ancora sul livello del campo di coordinate. Il nodo **Absolute** elimina il segno dei valori e rende il livello-set simmetrico rispetto allo zero; il successivo **Subtract** trasla numericamente il campo e introduce una **banda a spessore finito** attorno alla superficie implicita. In questo modo, la configurazione generata coincide con una regione strutturale a spessore controllato, adatta a essere letta come organizzazione interna del modulo. La distinzione tra configurazione **lattice** e configurazione **sheet-like** nasce precisamente in questo punto da una diversa costruzione del campo prima della sua discretizzazione.

Schema 5.3

Blocco b) formula del Giroide in notazione Geometry Nodes



Il contenimento della TPMS entro il volume finito del modulo è ottenuto introducendo un vincolo geometrico esterno già nella fase di definizione del campo. Il nodo **Comprare** calcola l'intersezione rispetto alla geometria contenitore e la restituisce producendo un

criterio di appartenenza che seleziona la regione effettivamente interna alla struttura. Il risultato è quindi una **Density** che descrive una porzione di campo già adattata al contenitore del modulo. In termini operativi, la morfologia finale nasce dall'interazione tra periodicità della TPMS, banda di spessore e vincolo di contenimento.

La discretizzazione finale del campo e l'estrazione della geometria avvengono attraverso la coppia **Volume Cube** e **Volume to Mesh**. Il primo nodo campiona il density field su una **griglia volumetrica tridimensionale**, trasformando il campo continuo in un volume voxel-based definito entro un dominio finito; il secondo estrae la frontiera isovaloriale del volume mediante una **threshold**, generando una mesh esplicita controllata da parametri di risoluzione e adattività. Il passaggio è metodologicamente decisivo perché rende la struttura implicita misurabile, confrontabile e parametrizzabile senza alterare il core. La stessa pipeline può quindi essere istanziata più volte variando i parametri di configurazione e, nel paragrafo successivo, la stessa **famiglia di superficie**.

5.1.4 Parametrizzazione della famiglia dei moduli TPMS

Famiglia TPMS	Traslazione Fase	Ripetizioni (X×Y×Z)	Spessore	Conf.	Codice
Diamond	assente	2×2×2	0.150	sheet	Diamond_nIPS_222_0.150_S
Diamond	assente	2×2×2	0.600	sheet	Diamond_nIPS_222_0.600_S
Diamond	assente	4×4×4	0.200	lattice	Diamond_nIPS_444_0.200_L
Diamond	assente	4×4×4	0.200	sheet	Diamond_nIPS_444_0.200_S
Diamond	assente	4×4×4	0.600	lattice	Diamond_nIPS_444_0.600_L
Gyroid	presente	2×2×2	0.150	sheet	Gyroid_IPS_222_0.150_S
Gyroid	presente	2×2×2	0.800	sheet	Gyroid_IPS_222_0.800_S
Gyroid	presente	3×3×3	1.000	lattice	Gyroid_IPS_333_1.000_L
Gyroid	presente	4×4×4	0.150	sheet	Gyroid_IPS_444_0.150_S
Scherk T	presente	2×2×2	0.150	sheet	ScherkT_IPS_222_0.150_S
Scherk T	presente	2×2×2	0.800	sheet	ScherkT_IPS_222_0.800_S
Scherk T	presente	5×5×5	0.300	sheet	ScherkT_IPS_555_0.300_S
Scherk T	presente	5×5×5	0.600	lattice	ScherkT_IPS_555_0.600_L
Schwarz P	assente	2×2×2	0.150	sheet	SchwarzP_nIPS_222_0.150_S
Schwarz P	assente	2×2×2	0.600	sheet	SchwarzP_nIPS_222_0.600_S
Schwarz P	assente	6×6×6	0.150	sheet	SchwarzP_nIPS_666_0.150_S
Schwarz P	assente	6×6×6	0.500	lattice	SchwarzP_nIPS_666_0.500_L

La parametrizzazione dei moduli assume come prima variabile la **famiglia di superficie**, intesa come contenuto morfogenetico del core. In questa fase, la variazione avviene mediante la sostituzione

Tabella 5.1

Configurazioni esemplificative del setup con fase, ripetizioni, spessore e configurazione

Tabella 5.2

Famiglie TPMS, formula implicita operativa, parametri principali, statuto della formula

Famiglia TPMS	Formula implicita operativa	Parametri principali
Schwarz P	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = t$	(t): soglia / isovalue
Gyroid (Schoen G)	$\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x) = t$	(t): soglia / isovalue
Diamond (Schwarz D)	$\sin(x) \sin(y) \sin(z) + \sin(x) \cos(y) \cos(z) + \cos(x) \sin(y) \cos(z) + \cos(x) \cos(y) \sin(z) = t$	(t): soglia / isovalue
Scherk's Tower	$\sinh(x) \sinh(y) - \sin(z) = t$	(t): soglia / isovalue

ti famiglie TPMS: **Schwarz P**, **Gyroid**, **Diamond** e **Scherk's Tower**. La **Tabella 5.2** raccoglie le formulazioni implicite operative assunte per ciascuna famiglia e ne distingue lo statuto: per alcune superfici si tratta di espressioni nodali o equivalenti già consolidate nell'uso scientifico, per altre di formulazioni operative adottate nel workflow per generare configurazioni morfologicamente riconoscibili entro lo stesso impianto algoritmico.

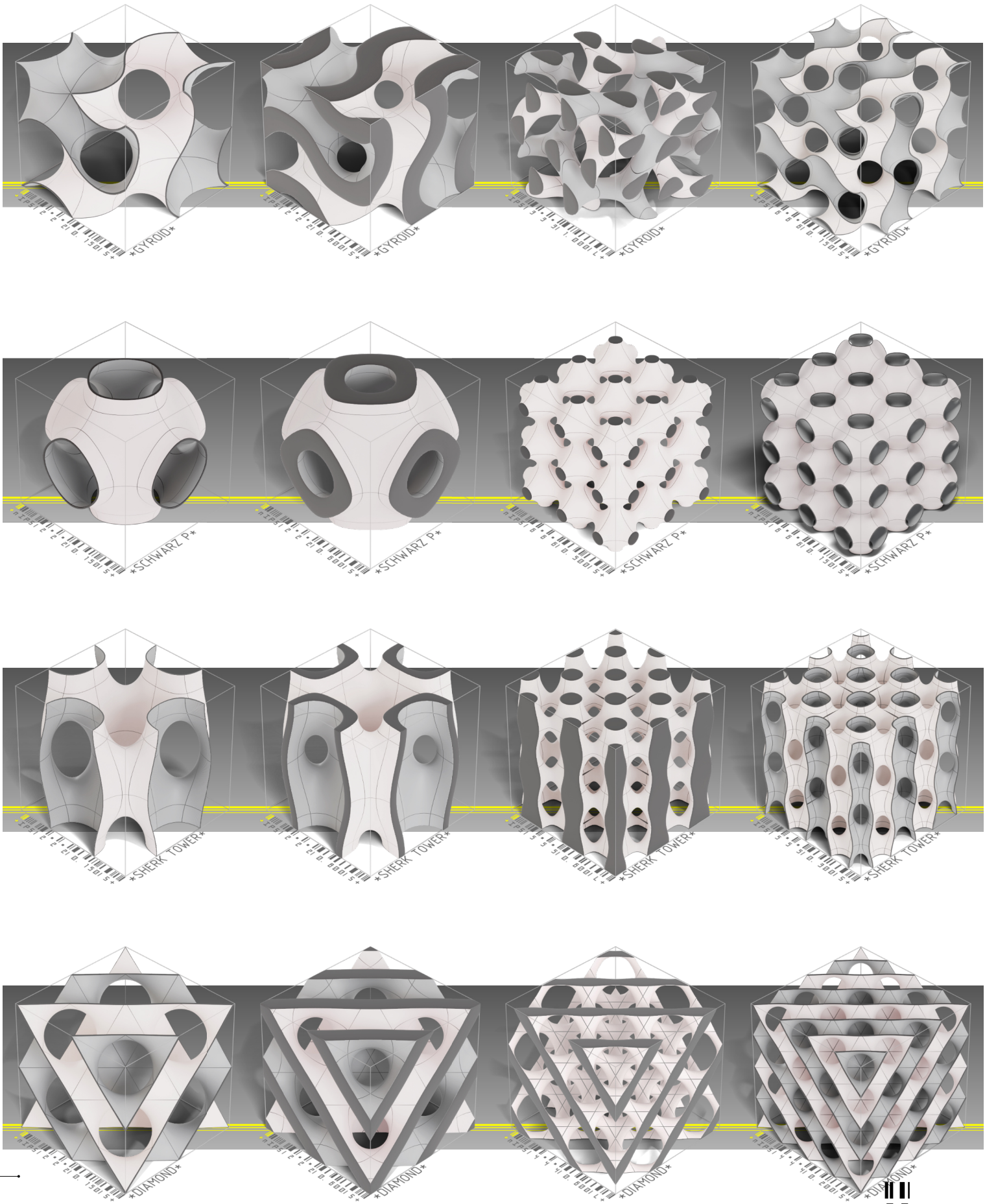
Il secondo parametro è il **numero di ripetizioni della cella** entro il volume del modulo. Dal momento che la periodicità della superficie è controllata dal riscaldamento del campo di coordinate prima della valutazione della funzione, la variazione del coefficiente di scala modifica la frequenza spaziale della TPMS nel dominio e quindi il rapporto tra dimensione del contenitore e densità interna della struttura. Questo passaggio consente di ottenere configurazioni a **cella singola** oppure configurazioni a **box array** senza alterare la struttura del core. Il modulo deriva dunque da una diversa distribuzione della periodicità implicita entro uno stesso volume finito.

A questi si aggiungono i parametri che controllano la **struttura locale** della superficie: **spessore**, assetto **lattice/sheet** e **adattamento al volume contenitore**. Ne consegue che la variazione di una stessa famiglia TPMS non produce soltanto versioni più o meno fitte della medesima figura, ma moduli differenti per comportamento morfologico, continuità dei setti e distribuzione dei vuoti, pur restando tutti riconducibili allo stesso scaffold implementativo.

Il risultato della parametrizzazione è quindi uno **spazio di moduli TPMS** costruito per sostituzione della relazione implicita e controllo numerico dei parametri. Questo è il punto decisivo della sezione: l'invarianza del core coincide con la permanenza di una stessa architettura computazionale capace di istanziare superfici periodiche differenti, scalarne la frequenza nel dominio e articularle in configurazioni morfologicamente confrontabili. In questa prospettiva, il Giroide conserva il ruolo di caso guida per la leggibilità del processo, ma la parametrizzazione mostra che il core è già predi-

Figura 5.2

Sintesi delle configurazioni TPMS generate, con evidenza del modulo a base di giroide assunto come caso guida



sposto a generare una pluralità di moduli TPMS entro una medesima logica operativa.

5.2 Moduli TPMS in fabbricazione additiva

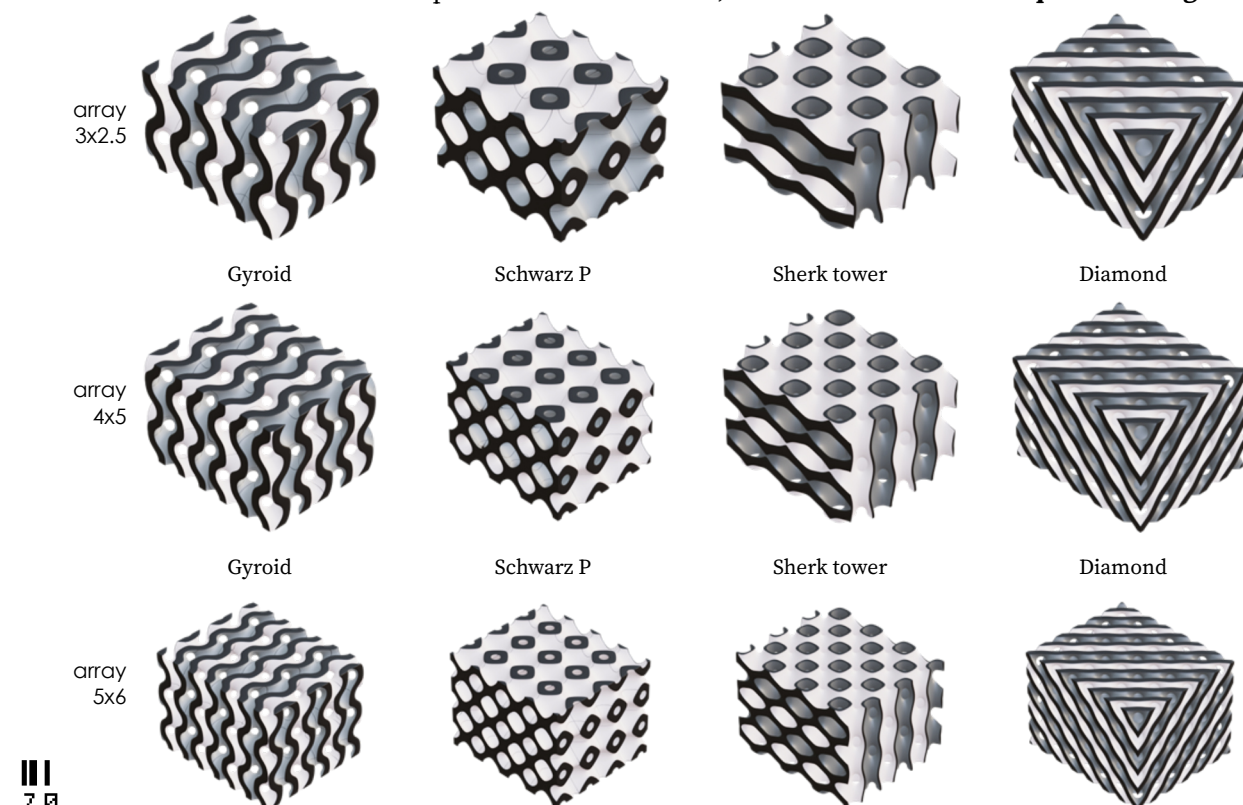
5.2.1 Impostazione del caso studio additivo e selezione dei moduli da verificare

Il primo banco di prova produttivo dei moduli TPMS descritti nel paragrafo 5.1 è costituito da un regime di fabbricazione additiva diretta in argilla, nel quale la questione centrale non è più la capacità del modello di generare varianti geometriche, ma la possibilità di trasferirle in un processo di deposizione layer-by-layer senza perdita di stabilità locale. In questa transizione, il modulo viene considerato come configurazione da verificare rispetto a un insieme di vincoli materiali e processuali espliciti. Il caso studio additivo è quindi impostato come primo filtro di producibilità del framework: sottopone una selezione controllata di moduli già definiti a un protocollo di validazione numerica e sperimentale.

La selezione del campione è costruita mantenendo costante l'involucro esterno del modulo e variando esclusivamente la morfologia interna secondo due assi comparabili: la famiglia TPMS adottata e la configurazione di array cellulare. Ne risulta una campagna composta da **dodici modelli**, ottenuti dall'incrocio tra **quattro famiglie**

Figura 5.3

Set sperimentale dei moduli TPMS sottoposti a verifica additiva, organizzato per famiglia geometrica e configurazione di array interno (totale: 12 modelli)



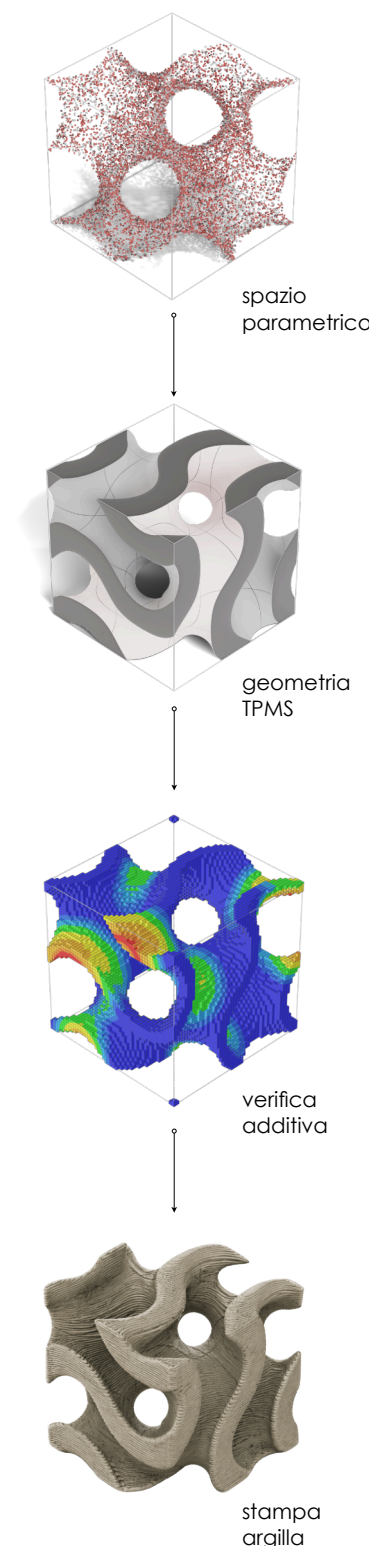
di superfici e tre configurazioni di ripetizione interna, organizzate in modo da rendere osservabile l'effetto della densità geometrica e della continuità morfologica sul comportamento di stampa. La scelta del campione ha quindi funzione analitica: il set è abbastanza ampio da mostrare che configurazioni formalmente coerenti all'interno dello stesso dominio parametrico possono produrre esiti produttivi radicalmente differenti quando vengono trasferite nel regime additivo.

In questa fase, "selezione" coincide con la definizione del perimetro dei casi da sottoporre a verifica. Tutte le configurazioni estratte dal set sperimentale vengono infatti assunte come ipotesi di producibilità, non come esiti già validati. La distinzione è metodologicamente decisiva, perché impedisce di leggere la transizione dal paragrafo 5.1 al 5.2 come continuità automatica tra generazione e fabbricazione. Al contrario, il passaggio introduce una soglia di decisione: solo il confronto tra simulazione di stampabilità e prototipazione reale potrà stabilire quali moduli siano compatibili con il processo di stampa e quali presentino condizioni critiche, parziali o fallimentari.

L'impostazione del caso studio additivo svolge pertanto una duplice funzione nel capitolo. Da un lato, consente di verificare il framework entro un regime di fabbricazione diretta, nel quale la producibilità dipende dall'interazione tra geometria interna, comportamento del materiale e condizioni di deposizione. Dall'altro, prepara i criteri di lettura delle sottosezioni successive, nelle quali i dodici modelli verranno discriminati attraverso simulazione FEM, classificazione degli errori e riscontro sperimentale. La campagna additiva costituisce dunque il dispositivo con cui lo spazio delle varianti generato algebricamente viene ricondotto a uno spazio più ristretto di configurazioni effettivamente compatibili con il processo.

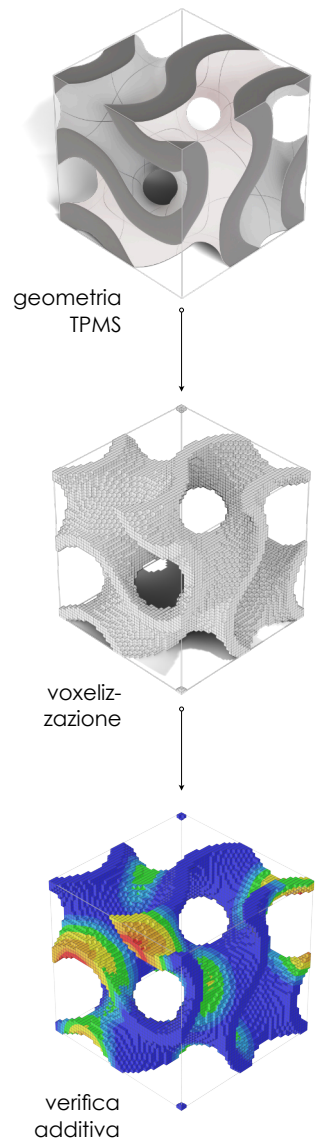
5.2.2 Validazione di stampabilità tramite voxelizzazione e simulazione FEM

La verifica di producibilità dei moduli selezionati è stata impostata come procedura numerica esplicita, costruita per valutare la stabilità della geometria durante il processo reale di deposizione stratificata. A questo scopo, i moduli TPMS derivati dal paragrafo 5.1 sono stati trasferiti in una pipeline digitale che collega direttamente il modello geometrico all'ambiente di simulazione FEM, così da trasformare ciascuna configurazione in un caso analizzabile rispetto a materiale, parametri di stampa e condizioni di vincolo. Il cuore del sistema di verifica è l'impiego di **VoxelPrint**, software sviluppato per generare file di simulazione Abaqus a partire da modelli tridi-



Schema 5.4

Passaggio dallo spazio parametrico dei moduli TPMS al set di configurazioni sottoposte a verifica additiva



Schema 5.5

Pipeline di validazione: modello → voxelizzazione → Abaqus.

mensionali voxelizzati, originariamente nel campo della stampa di materiali viscosi e qui adattato al caso dell’estrusione di argilla ²³.

Il passaggio decisivo è la **voxelizzazione** del modulo, cioè la discretizzazione della sua geometria in un insieme regolare di elementi finiti identici. Tale operazione consente di ricondurre una morfologia interna continua a una struttura computabile, sulla quale possono essere assegnati parametri di materiale e di processo coerenti con la simulazione di stampa. La catena operativa comprende la conversione del modello, la definizione del materiale, l’impostazione dei parametri di stampa, l’anteprima voxel e la generazione del file di input per Abaqus. In questo modo la geometria interna del modulo viene tradotta in un modello discretizzato che rende osservabile la relazione tra topologia interna, densità locale e risposta meccanica in fase di crescita.

Una volta importato in **Abaqus**, ciascun modello è stato sottoposto ad **analisi statica non lineare**, configurata per simulare il processo di deposizione in forma progressiva. In questo assetto, il parametro **number_of_steps** assume un ruolo strutturale, poiché definisce il numero di passaggi in cui l’intero processo di stampa viene suddiviso: ogni step corrisponde a una porzione della costruzione layer-by-layer e consente di ricostruire numericamente l’accumulo progressivo del materiale, monitorando gli spostamenti che si generano durante la crescita del modulo. La stampabilità è quindi letta come esito temporale del processo e non come semplice proprietà finale della forma. Questa impostazione rende possibile verificare se una stessa famiglia TPMS, al variare del box array, mantenga una risposta compatibile con la deposizione oppure introduca condizioni di instabilità locale già nelle fasi intermedie della costruzione.

Per mantenere continuità tra ambiente numerico e processo reale, le simulazioni sono state impostate adottando parametri coerenti con la successiva prototipazione: **layer height = 1 mm**, **nozzle diameter = 2 mm**, **printing speed ≈ 30 mm/s**, con proprietà del materiale modificate rispetto al setup originario di VoxelPrint per rappresentare l’estrusione di argilla anziché quella di calcestruzzo. Inoltre, nel caso delle celle analizzate come porzioni rappresentative di un sistema periodico più ampio, sono state imposte condizioni al contorno che inibiscono gli spostamenti ortogonali ai piani di taglio, così da evitare che l’isolamento artificiale del campione alteri il comportamento della configurazione interna. Ne deriva che il filtro di producibilità introdotto in questa sezione è fondato su una simulazione processuale ad alta aderenza operativa.

Parametro	Valore / impostazione	Funzione nella simulazione
Ambiente FEM	Abaqus	Esecuzione dell’analisi di stampabilità
Tipo di analisi	Analisi statica non lineare	Valutazione dei grandi spostamenti durante la deposizione progressiva
Modello geometrico di partenza	Moduli TPMS selezionati dal set sperimentale	Base morfologica della simulazione
Discretizzazione	Voxelizzazione della geometria	Conversione della morfologia continua in elementi finiti regolari simulabili
Numero di configurazioni simulate	12	Campagna completa derivata da 6 famiglie TPMS × 3 configurazioni di array
Variabili geometriche investigate	Famiglia TPMS; numero di ripetizioni cellulari	Verifica comparativa dell’effetto della morfologia interna sulla Stampabilità
Layer height simulato	1 mm	Ricostruzione della deposizione stratificata coerente con la stampa reale
Nozzle diameter simulato	2 mm	Definizione dello spessore di estrusione nel modello processuale
Printing speed simulata	30 mm/s	Allineamento tra setup numerico e setup di prototipazione
Materiale simulato	Argilla estrusa	Adattamento del modello materiale rispetto al setup originario di VoxelPrint per calcestruzzo
Parametri del materiale	Modificati e adattati alla simulazione dell’estrusione di argilla	Coerenza tra simulazione e comportamento del materiale reale
Sequenza di costruzione	Layer-by-layer	Ricostruzione incrementale del processo di stampa
number_of_steps	Parametro di suddivisione progressiva del processo	Definisce il numero di step con cui la stampa viene simulata nel tempo
Condizioni al contorno	Inibizione degli spostamenti ortogonali ai piani di taglio della cella	Simulazione di continuità della geometria periodica pur analizzando una cella isolata
Output principali	Spostamenti nodali; stabilità locale; collasso / non collasso	Base per la classificazione degli esiti di stampabilità

5.2.3 Criteri di esito e classificazione degli errori

L’esito della validazione viene espresso come classificazione operativa delle condizioni con cui la geometria interna reagisce al processo di deposizione. Nel caso in esame, il filtro di producibilità è costruito su quattro stati distinti: **cell collapse**, **partial cell collapse**, **perfectly printable model** e **too dense error**. I primi tre derivano direttamente dalla simulazione FEM e descrivono il comportamento del modulo durante la crescita layer-by-layer; il quarto emerge in-

Tabella 5.3

Parametri principali della simulazione Abaqus

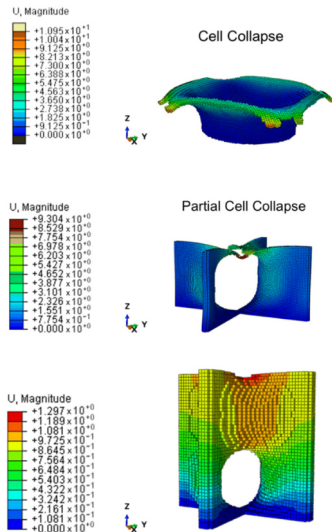


Figura 5.4

Immagini della simulazione FEM dei moduli TPMS, con visualizzazione degli spostamenti e delle zone critiche durante il processo di deposizione layer-by-layer

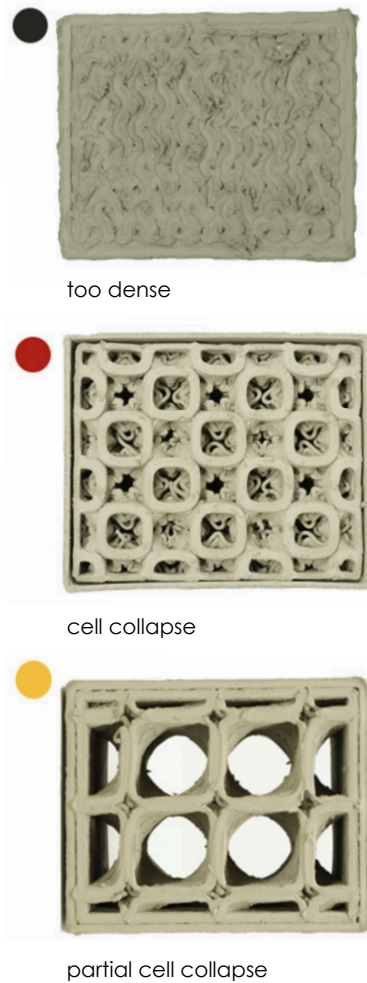


Figura 5.5

Esempi visivi delle tre categorie di errore e della condizione di stampabilità

Tabella 5.4

Classificazione degli esiti per famiglia TPMS e configurazione

vece nel confronto con la prototipazione reale e intercetta un limite non strutturale in senso stretto, ma tecnologico, legato alla risoluzione della macchina e alla precisione dell'estrusione. La classificazione serve quindi a trasformare la producibilità in un criterio selettivo interno allo spazio parametrico: ogni configurazione viene mantenuta, scartata o problematizzata in funzione del tipo di errore che manifesta.

Nel **cell collapse**, la deformazione diventa irreversibile e impedisce la prosecuzione del processo, poiché il cedimento locale non consente la deposizione corretta degli strati successivi. Nel caso studio, questa condizione è associata a configurazioni in cui l'aumento dimensionale della cella interna produce porzioni troppo estese con tangenti quasi orizzontali o sbalzi insufficientemente sostenuti; nella lettura FEM il fenomeno si manifesta con spostamenti elevati diffusi lungo gli ultimi layer, con valori medi dell'ordine di **~7 mm** e picchi nelle zone maggiormente aggettanti pari a **~11 mm**. Il **partial cell collapse** corrisponde invece a una condizione-limite: la stampa può teoricamente continuare, ma una parte della geometria subisce un cedimento locale che altera la corrispondenza tra modello digitale e prototipo fisico. Anche qui gli spostamenti risultano elevati, dell'ordine di **~9 mm**, ma rimangono concentrati in una porzione circoscritta della cella, mentre il resto del modulo conserva deformazioni basse, circa **~0,07 mm**. Il **perfectly printable model**, infine, identifica le configurazioni in cui non si registrano né collassi né deformazioni locali significative; nei risultati simulativi, tale stato è associato a spostamenti degli ultimi layer inferiori a **1 mm**, cioè circa un ordine di grandezza minore rispetto ai casi di collasso.

La quarta classe, definita **too dense error**, modifica in modo decisivo la logica del filtro perché non coincide con un collasso previsto dal modello FEM. In questo caso il modulo non fallisce per instabilità strutturale durante la crescita, ma perché la geometria interna diventa troppo densa rispetto alla risoluzione della macchina, al diametro dell'ugello e alla capacità del materiale di mantenere separati vuoti di piccola dimensione. L'errore si manifesta quando l'elevato numero di ripetizioni cellulari riduce eccessivamente il vuoto interno: l'estruso tende allora a sovrapporsi dove dovrebbe restare distinto, facendo perdere al modulo le sue caratteristiche geometriche originarie. Il punto è metodologicamente rilevante perché introduce una soglia ulteriore rispetto alla sola simulazione: mentre **collapse** e **partial collapse** sono prevedibili numericamente e quin-

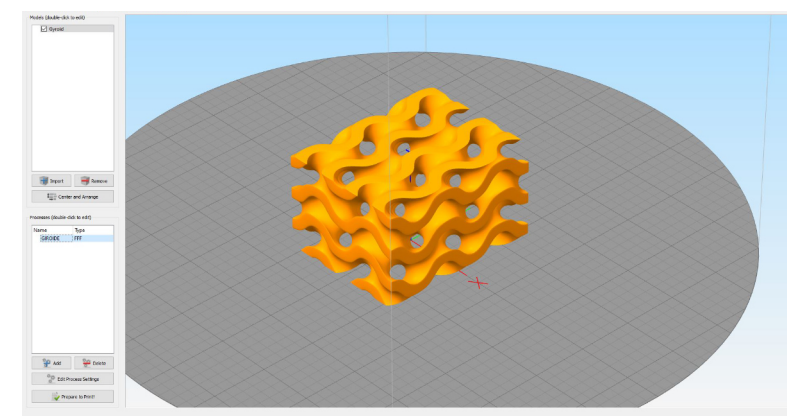
Famiglia TPMS	Box array 2.5 × 3	Box array 4 × 5	Box array 5 × 6
Gyroid	Printable	Printable	Too dense error
Schwarz P	Cell collapse	Printable	Printable
Diamond	Printable	Printable	Printable
Sherk tower	Partial cell collapse	Printable	Printable

di prevenibili già nella fase FEM, il **too dense error** emerge soltanto nel passaggio alla prototipazione e segnala il limite di risoluzione del sistema produttivo specifico adottato.

Letta in questa forma, la classificazione mostra che la producibilità non dipende da una gerarchia lineare di complessità formale, ma dalla relazione concreta tra tipologia di superficie, numero di ripetizioni interne e limiti del processo additivo. Le configurazioni con **box array 2.5 × 3** risultano più esposte a collasso o collasso parziale per effetto dell'aumento della dimensione cellulare; all'estremo opposto, alcune configurazioni **5 × 6** introducono errori di densità eccessiva, pur essendo formalmente coerenti e in parte stabili in sede di simulazione.

5.2.4 Pipeline produttiva reale: slicing, materiale e parametri di stampa

Superata la fase di verifica numerica, i moduli selezionati sono stati trasferiti a una fase produttiva reale finalizzata a verificare se le condizioni di stampabilità individuate in simulazione risultassero effettivamente riscontrabili in fabbricazione additiva diretta. Il passaggio alla stampa non è una semplice conferma visiva del modello FEM, ma rappresenta una soglia di validazione del caso studio, nella quale il comportamento del modulo viene messo in relazione con una macchina specifica, un materiale reale e un set definito di parametri di processo. L'ambiente operativo è quello della deposizione estrusiva di argilla mediante **Delta Wasp 40100**, mentre la preparazione del percorso macchina è stata condotta in **Simplify3D**, così da mantenere il collegamento tra discretizzazione del modello, sequenza dei layer e condizioni effettive di stampa.



La materia prima utilizzata per la prototipazione è un impasto argilloso preparato per estrusione, con **percentuale d'acqua pari al 20%**, selezionata per garantire un compromesso tra pompabilità, continuità del filamento e capacità di autosostegno dei layer superiori. L'intera campagna è stata condotta in un laboratorio a micro-

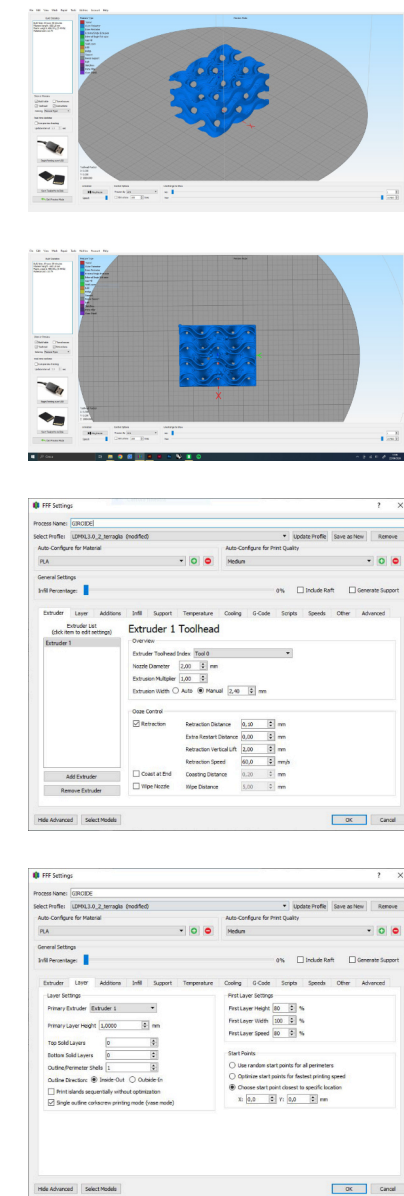


Figura 5.6

Screenshot di slicing del modulo in Simplify3D, con visualizzazione del percorso di deposizione e della sequenza stratificata

clima controllato, con **temperatura intorno a 20 °C** e **umidità relativa pari a circa 60%**, così da ridurre l'incidenza delle variabili ambientali sul comportamento dell'argilla durante la deposizione.

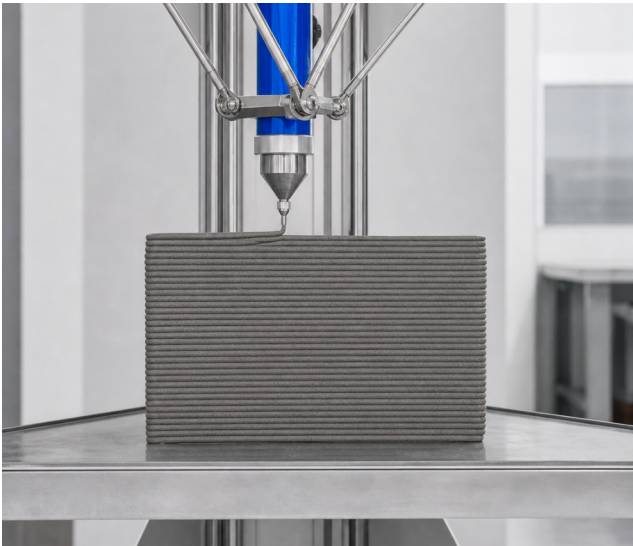
I parametri operativi sono stati impostati in coerenza con quelli già assunti in simulazione, così da rendere confrontabili ambiente numerico e ambiente fisico. In particolare, la campagna di stampa è stata eseguita con **layer height = 1 mm**, **nozzle diameter = 2 mm** e **printing speed ≈ 30 mm/s**. La scelta di mantenere questo allineamento ha una funzione epistemica: consente di attribuire eventuali differenze tra esito FEM ed esito reale al comportamento concreto del materiale e ai limiti di risoluzione del sistema di stampa. In questo quadro, la stampa dei moduli verifica oltre che la stabilità globale della configurazione, anche la capacità del processo LDM di preservare geometrie interne complesse, continuità di parete e separazione dei vuoti all'interno della maglia TPMS.

Tabella 5.5

Parametri di stampa

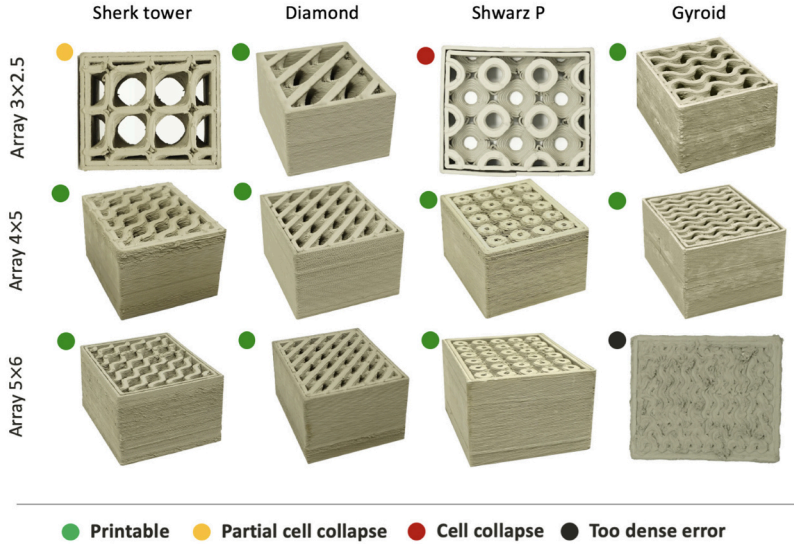
Parametro	Valore / impostazione	Funzione nel processo
Stampante	Delta Wasp 40100	Deposizione additiva diretta del materiale argilloso
Slicer	Simplify3D	Generazione del percorso e preparazione del processo
Materiale	Argilla per estrusione	Formazione del modulo fisico
Composizione principale dell'argilla	SiO2 43.8%; Al2O3 15.3%; TiO2 0.5%; Fe2O3 4.1%; CaO 11.6%; MgO 1.8%; K2O 2.6%; Na2O 1.5%; CaCO3 19.3%	Definizione della base minerale del materiale di stampa
Contenuto d'acqua	20%	Controllo della lavorabilità e della coesione del filamento
Layer height	1 mm	Definizione della risoluzione verticale e della crescita stratificata
Nozzle diameter	2 mm	Controllo dello spessore effettivo dell'estruso
Printing speed	~ 30 mm/s	Regolazione del tempo di deposizione e della continuità del flusso
Temperatura ambiente	~ 20 °C	Stabilizzazione delle condizioni di stampa
Umidità relativa ambiente	$\sim 60\%$	Controllo del microclima durante la prototipazione
Ambiente di stampa	Laboratorio a microclima controllato	Riduzione della variabilità termo-igrometrica durante la prototipazione

L'assetto produttivo così definito rende leggibile il trasferimento del modulo dal dominio della simulazione a quello della fabbricazione, mostrando come la validazione additiva richieda una precisa messa a punto del processo. La coerenza tra slicing, materiale e parametri di stampa costituisce infatti la condizione necessaria per interpretare correttamente gli esiti della campagna prototipale: solo a parità di setup è possibile distinguere i casi di effettiva compatibilità produttiva dai casi in cui la forma, pur risultando ammissibile sotto il profilo simulativo, incontra limiti dovuti alla risoluzione della macchina o al comportamento dell'argilla in deposizione.



5.2.5 Prototipazione, confronto simulazione-stampa e chiusura del caso

La fase conclusiva del caso studio additivo è consistita nella prototipazione reale dell'intero set di **dodici moduli**, con l'obiettivo di verificare se gli esiti della simulazione FEM trovassero conferma nel comportamento effettivo del materiale durante la deposizione. La campagna sperimentale è stata quindi impostata come riscontro sistematico dell'intero dominio testato nelle sezioni precedenti. L'esito generale mostra una convergenza elevata tra previsione numerica e stampa reale: i moduli classificati in simulazione come **cell collapse** hanno effettivamente manifestato collasso in fase di stampa, con necessità di arresto del processo; la configurazione letta come **partial cell collapse** ha mostrato in prototipazione un cedimento locale coerente con la previsione; i moduli classificati come **printa-**



● Printable ● Partial cell collapse ● Cell collapse ● Too dense error



Figura 5.7

Setup di stampa del caso studio additivo: Delta Wasp 40100, materiale argilloso e condizioni operative di laboratorio

Figura 5.8

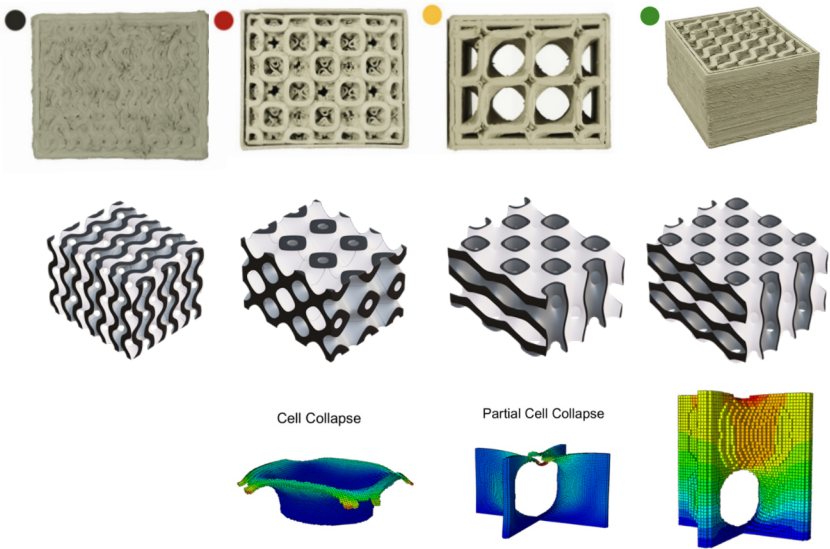
Prototipi stampati della campagna additiva, con visualizzazione comparativa dei 18 moduli TPMS realizzati e dei rispettivi esiti di stampa

ble sono risultati in larga parte effettivamente realizzabili. La campagna prototipale conferma così che il modello FEM non descrive una condizione astratta di stabilità, ma intercetta in modo affidabile il comportamento del modulo all'interno del processo additivo reale.

Il confronto puntuale tra simulazione e prototipazione evidenzia tuttavia due scarti significativi, entrambi concentrati nella configurazione 5 × 6 di moduli ad alta densità interna. In particolare, il modulo **Gyroid** 5 × 6, previsto come stampabile dal modello FEM, ha manifestato in stampa un **too dense error**, dovuto all'insufficiente risoluzione del sistema di estrusione rispetto alla finezza dei vuoti interni. In questi casi l'argilla estrusa tende a sovrapporsi in zone che, sul piano geometrico, dovrebbero restare separate, con perdita delle caratteristiche morfologiche previste dal modello digitale. Il confronto tra previsione e risultato mostra quindi una doppia soglia di validazione: da un lato la simulazione intercetta correttamente i fenomeni di cell collapse e partial cell collapse; dall'altro la stampa reale rende visibile un ulteriore limite tecnologico, non pienamente leggibile nella sola analisi FEM, legato alla precisione dell'ugello, alla densità del materiale e alla riduzione del rapporto di vuoto.

Figura 5.9

Confronto tra output FEM e stampa reale: corrispondenza tra casi di collapse, partial collapse, printable e casi di too dense error emersi in prototipazione



Il quadro sintetico degli esiti può essere ricondotto alla seguente matrice comparativa, che rende esplicito il passaggio dalla validazione numerica all'esito finale di producibilità del modulo.

Nel quadro finale della campagna, il **Diamond** emerge come la famiglia più robusta, risultando producibile in tutte le configurazioni investigate; **Sherk tower**, **Schwarz P** e **Gyroid** mostrano una buona compatibilità con il processo, ma entro intervalli specifici del box array. Il **Gyroid**, pur non essendo la configurazione più performan-

Famiglia TPMS	Box array 2.5 × 3	Box array 4 × 5	Box array 5 × 6
Gyroid	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile	FEM: printable / Prototipo: too dense error / Esito finale: non producibile con questo setup
Schwarz P	FEM: collapse / Prototipo: collapse / Esito finale: non producibile	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile
Diamond	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile
Sherk tower	FEM: partial collapse / Prototipo: partial collapse / Esito finale: producibilità critica	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile	FEM: printable / Prototipo: printable / Esito finale: producibile

te in assoluto, mantiene un ruolo metodologicamente centrale nel caso studio: da un lato conferma la trasferibilità del modulo in configurazioni intermedie, dall'altro mostra con chiarezza il punto in cui l'aumento della densità interna sposta il problema dal collasso strutturale al limite di risoluzione del processo. La chiusura del caso additivo consente quindi di formulare la prima validazione produttiva del framework: il core generativo resta invariato, mentre la selezione dei moduli producibili emerge dall'azione di un filtro multi-livello — simulativo e prototipale — che discrimina le configurazioni in base alla loro compatibilità operativa con materiale, macchina e parametri di stampa.

5.3 Modulo TPMS in fabbricazione sottrattiva su scala architettonica

5.3.1 Impostazione del caso studio sottrattivo e selezione del modulo in scala architettonica

Il presente caso studio costituisce la seconda verifica produttiva del framework e introduce un passaggio metodologicamente necessario dal regime additivo diretto, analizzato nel paragrafo precedente, a un regime sottrattivo diretto su scala architettonica. La ragione del cambio di regime risiede nella ridefinizione del filtro geometrico-produttivo: se nel caso additivo la selezione delle configurazioni dipendeva dalla stampabilità e dalla stabilità della deposizione stratificata, nel caso sottrattivo la producibilità dipende invece dall'accessibilità utensile, dalla presenza di sottosquadri, dalla segmentabilità del volume e dalla coerenza della sequenza di lavorazio-

Tabella 5.6

Confronto sintetico simulazione / prototipo / esito finale

ne. Il presente paragrafo va quindi letto come applicazione esplicita della logica multi-regime formalizzata nel Capitolo 4: la stessa famiglia morfogenetica viene verificata entro un diverso campo operativo, in cui il criterio di compatibilità materiale si evolve senza cambiare la struttura algoritmica che ha generato il modulo.

Assunto come già costruito nel paragrafo 5.1 lo spazio parametrico dei moduli TPMS, il caso sottrattivo seleziona come configurazione guida un **modulo Gyroid** e ne trasferisce la verifica alla scala **1 × 1 × 1 m**, cioè a una dimensione in cui la questione diventa la sua effettiva traducibilità in un processo di fresatura robotica e successivo assemblaggio. Il passaggio alla scala architettonica non comporta soltanto un incremento dimensionale, ma una riformulazione del problema produttivo.

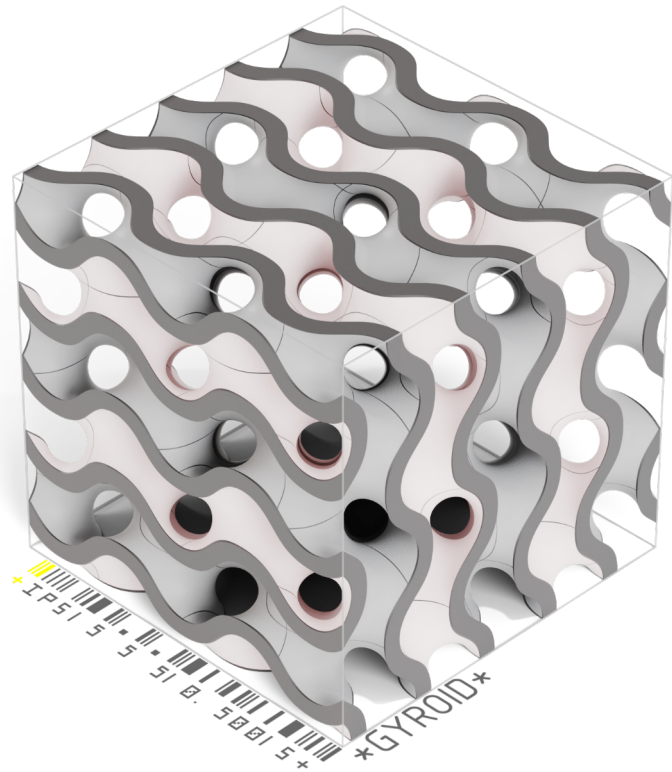


Figura 5.10

Modulo Gyroid selezionato per la validazione sottrattiva su scala architettonica

La configurazione selezionata per il prototipo finale è una struttura **sheet-like** composta da **5 × 5 × 5 celle Gyroid**, con **spessore pari a 5 cm**. La scelta della variante sheet-like, in luogo di una configurazione lattice, è motivata da un criterio direttamente produttivo: il rapporto tra pieni e vuoti, la continuità delle superfici e la necessità di mantenere uno spazio sufficiente per la lavorazione CNC rendono questa soluzione più compatibile con il regime sottrattivo adottato. La continuità della superficie, la leggibilità morfologica del sistema e la compatibilità tra spessore della struttura e lavorazione per asportazione di materiale rendono infatti questa configurazione più

adatta alla successiva validazione del sottosquadro, alla segmentazione del volume e alla lavorazione a doppia faccia. In questa prospettiva, la scelta del modulo va letta come prima selezione di producibilità: tra le varianti già generabili dal core, viene assunta quella che offre le condizioni più favorevoli per la verifica operativa nel regime sottrattivo.

Parametro	Valore / impostazione	Ruolo nel caso studio
Famiglia morfogenetica	Gyroid	Configurazione TPMS guida del caso sottrattivo
Scala del modulo	1 × 1 × 1 m	Trasferimento alla scala architettonica
Configurazione	Sheet-like	Soluzione selezionata per compatibilità produttiva
Numero di celle	5 × 5 × 5	Definizione della periodicità interna del modulo
Spessore	5 cm	Compromesso tra leggibilità morfologica e lavorabilità
Materiale	Terrazzo / simil-pietra da polvere di marmo	Supporto fisico della fabbricazione sottrattiva
Obiettivo produttivo	Lavorazione robotica e assemblaggio	Verifica della producibilità nel regime sottrattivo

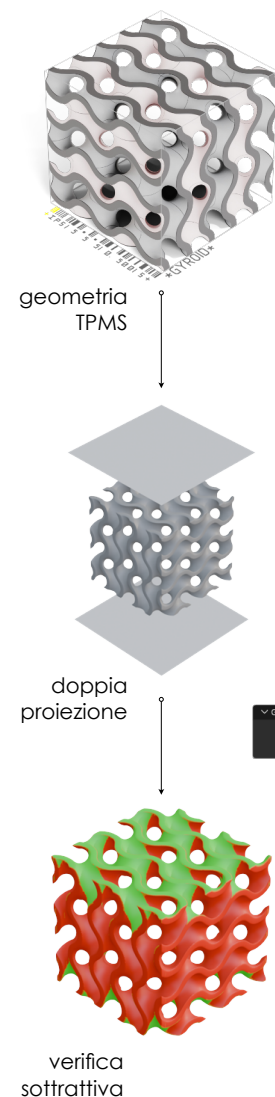
Il materiale adottato è un **terrazzo derivato da scarti di lavorazione del marmo**, scelto come supporto simil-pietra per la fabbricazione del prototipo. Anche in questo caso il dato materiale non è secondario: la combinazione tra massa, lavorabilità e possibilità di dettaglio rende il modulo un banco di prova significativo per verificare se una morfologia TPMS, già definita digitalmente, possa essere tradotta in una sequenza costruttiva per asportazione di materiale e successiva ricomposizione per parti. L'analisi che segue giustifica come la selezione di questa configurazione, con questi parametri geometrici e materiali, diventi il caso adatto per inaugurare la verifica sottrattiva del framework.

5.3.2 Validazione geometrico-produttiva della mesh e controllo del sottosquadro

Prima della formalizzazione CAM, il modulo selezionato è stato sottoposto a una validazione geometrico-produttiva della mesh finalizzata a verificare la sua compatibilità con una lavorazione a doppia faccia. Il controllo riguarda l'accessibilità della geometria rispetto a una direzione di lavorazione assegnata. In questa fase, il sottosquadro viene quindi definito come porzione di superficie non raggiungibile mediante proiezione opposta lungo l'asse Z e la validazione assume deliberatamente un'ipotesi semplificata: l'utensile è trattato come entità di dimensione infinitesimale, così che il test non simuli ancora la fresatura reale nei suoi parametri fisici, ma costruisca una mappa preliminare di raggiungibilità geometrica. In termini metodologici, questo passaggio introduce il primo filtro di producibilità del caso sottrattivo: il modulo è considerato lavorabile solo nella mi-

Tabella 5.7

Parametri geometrici e materiali del modulo architettonico

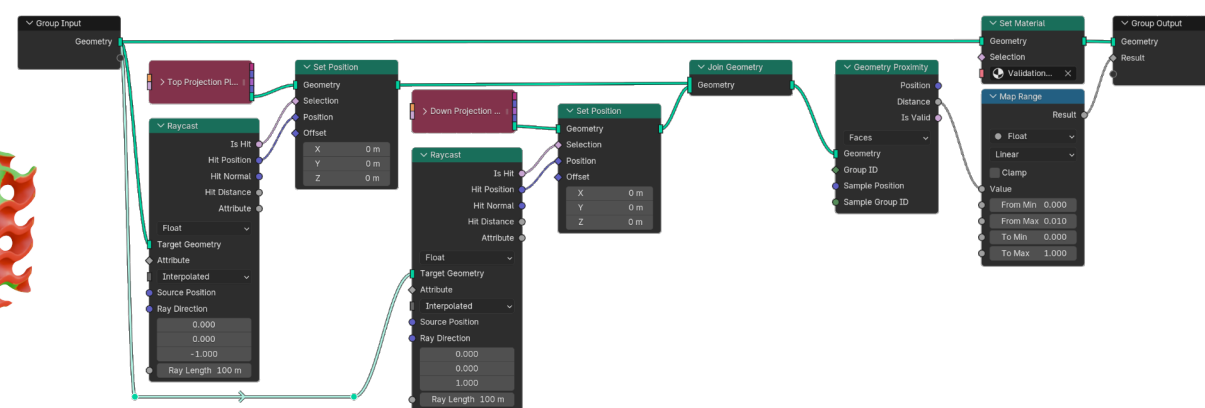


Schema 5.6

Logica della validazione geometrico-produttiva: mesh → doppia proiezione → mappa di raggiungibilità

sura in cui le sue superfici risultano accessibili, integralmente o per segmenti, da una lavorazione bidirezionale.

Operativamente, il setup è costruito in Geometry Nodes a partire dalla mesh del modulo e da due piani ad alta discretizzazione, superiore e inferiore, ciascuno con **1000 × 1000 divisioni**. I due piani vengono proiettati sulla geometria lungo direzioni opposte dell'asse Z mediante l'accoppiata **Raycast + Set Position**: il nodo **Raycast** interseca raggi provenienti dalla geometria sorgente con una geometria target e restituisce, tra gli altri output, la posizione di impatto; il nodo **Set Position** riscrive quindi la posizione dei punti della geometria in ingresso, consentendo di riposizionare i vertici del piano sulle coordinate di impatto individuate dal raycasting. In questo modo il piano superiore genera una proiezione delle superfici raggiungibili da sopra, mentre il piano inferiore costruisce l'analoga proiezione delle superfici raggiungibili da sotto. Le due proiezioni rappresentano una doppia superficie campionata che sintetizza l'insieme delle porzioni effettivamente accessibili alla lavorazione lungo $\pm Z$.



Schema 5.7 – Custom Geometry Nodes setup per il controllo del sottosquadro

Una volta ottenute le due proiezioni, queste vengono riunite e confrontate con la mesh originale attraverso **Geometry Proximity**, nodo che calcola la posizione più vicina sulla geometria target e la relativa distanza. Nel presente setup, la distanza tra la mesh del modulo e la doppia proiezione viene rimappata in un gradiente visivo mediante **Map Range** e associata a un materiale di validazione: le aree con distanza prossima a zero risultano coperte dalla doppia proiezione e quindi potenzialmente raggiungibili; al crescere della distanza compaiono invece le zone rosse, che identificano le porzioni non intercettate da nessuna delle due proiezioni e dunque interpretabili come sottosquadro residuo rispetto alla lavorazione a doppia faccia. La validazione della mesh si configura come una mappa di accessibilità geometrica bidirezionale: uno strumento prelimi-

nare che precede la simulazione dell'utensile reale, finalizzato per distinguere le superfici lavorabili dalle aree critiche che richiedono la segmentazione del volume.

L'analisi di tre sezioni giroide a spessore crescente mostra con chiarezza che l'aumento dello spessore produce una crescita progressiva dell'area rossa, soprattutto nelle regioni concave, nei tratti rientranti e nelle porzioni inferiori delle superfici continue. La relazione è diretta: quanto più la sezione si ispessisce, tanto più aumenta il volume di geometria non coperto dalla doppia proiezione e quindi non risolvibile mediante semplice lavorazione opposta lungo Z. Questo risultato rende esplicita la funzione del test: individuare la soglia oltre la quale la continuità morfologica del modulo non è più compatibile con la lavorazione diretta e richiede slicing e lavorazione a doppia faccia come strategia di riformulazione produttiva. La validazione geometrico-produttiva della mesh fornisce pertanto il criterio operativo con cui verranno posizionati i piani di taglio nella sezione successiva.

Esito della mappa di validazione	Interpretazione produttiva	Implicazione operativa
Prevalenza di aree verdi	Superficie largamente raggiungibile da $\pm Z$	Slice potenzialmente lavorabile senza criticità rilevanti
Presenza localizzata di aree rosse	Criticità puntuali di accessibilità	Possibile lavorazione, ma con controllo della posizione del piano di slicing
Estensione continua di aree rosse	Sottosquadro residuo significativo	Necessità di ridurre lo spessore utile della sezione o riposizionare i piani di taglio
Crescita del rosso all'aumentare dello spessore	Perdita progressiva di lavorabilità per doppia proiezione	Segmentazione del volume come risposta produttiva necessaria

Tabella 5.8 – Criteri di lettura della validazione della mesh e implicazioni sullo slicing

5.3.3 Segmentazione del volume, slicing e formalizzazione del processo CAM

La validazione geometrico-produttiva introdotta nella sezione precedente rende esplicito che il modulo, assunto come volume continuo, non è direttamente compatibile con una lavorazione sottrattiva bidirezionale lungo Z. La presenza di porzioni non coperte dalla doppia proiezione mostra infatti che l'accessibilità utensile non può essere garantita sull'intera geometria in assetto monolitico. In questo quadro, lo **slicing** costituisce la risposta operativa necessaria al filtro di lavorabilità: il volume viene segmentato in modo da trasformare una morfologia continua, affetta da sottosquadri residui, in una sequenza di parti discrete ciascuna compatibile con una lavorazione a doppia faccia. La segmentazione è quindi il dispositivo che

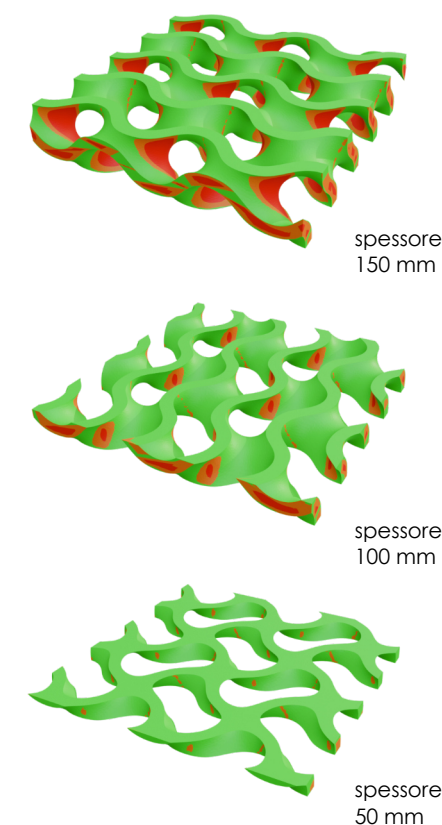
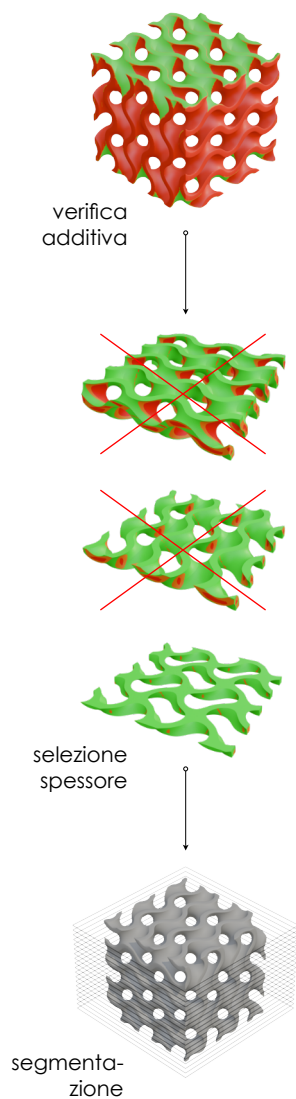


Figura 5.11

Mappa cromatica delle zone raggiungibili e non raggiungibili sulla mesh, confronto tra tre sezioni a spessore crescente e corrispondente aumento del sottosquadro residuo



Schema 5.8

Dalla mappa di sottosquadro alla segmentazione del volume

traduce il risultato della validazione della mesh in una strategia produttiva concreta.

Operativamente, il modulo architettonico viene suddiviso in **20 sezioni** ottenute mediante **19 piani di slicing** orizzontali. La posizione dei piani non è arbitraria: essa deriva dalla necessità di limitare, all'interno di ogni singola sezione, l'estensione delle aree non raggiungibili evidenziate dalla mappa di validazione. In altri termini, i piani vengono collocati in modo che ciascuna slice risulti lavorabile da sopra e da sotto senza conservare sottosquadri incompatibili con la lavorazione a doppia faccia. Il criterio è quindi quello di controllare il rapporto tra spessore della sezione e accessibilità geometrica. La segmentazione riduce così la complessità morfologica continua del modulo a una serie di componenti che mantengono la logica del giroide, ma la riformulano in una struttura compatibile con il processo sottrattivo.

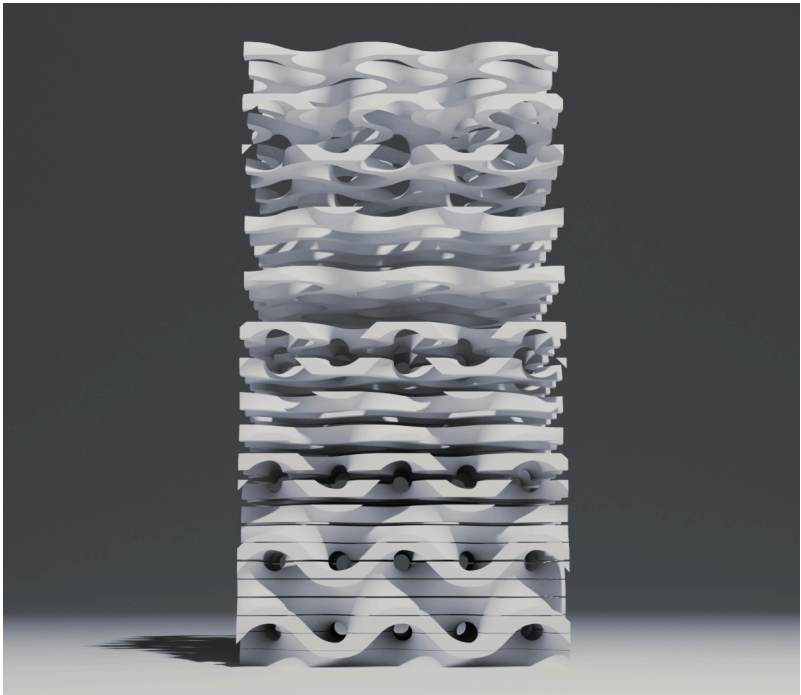


Figura 5.12 – Modulo esploso in 20 slice ottenute mediante 19 piani di slicing

Questa operazione produce un duplice effetto. Da un lato, ogni slice diventa un'unità produttiva autonoma, con un proprio fronte superiore e inferiore lavorabile; dall'altro, il modulo complessivo viene riconfigurato come sistema assemblabile, nel quale la continuità della morfologia finale è ottenuta per ricomposizione controllata di sezioni discrete. La formalizzazione del processo CAM prende così avvio: una volta definita la segmentazione, ciascuna slice può essere trasferita all'ambiente di lavorazione come geometria distinta, con-

sentendo di impostare in modo coerente orientamento, superfici di appoggio, sequenza delle operazioni e successiva simulazione robotica. Lo slicing svolge dunque una funzione intermedia decisiva agendo da interfaccia per tradurre il modulo in un'entità formalmente trattabile dal sistema CAM.

Parametro	Valore / impostazione	Funzione produttiva
Scala del modulo	1 × 1 × 1 m	Definisce il volume complessivo da segmentare
Numero di slice	20	Suddivisione del modulo in unità lavorabili
Numero di piani di slicing	19	Generazione delle superfici di separazione tra le slice
Orientamento dei piani	Orizzontale	Coerenza con la lavorazione bidirezionale lungo Z
Criterio di posizionamento	Riduzione del sottosquadro per sezione	Trasformazione della validazione mesh in strategia di taglio
Variabile critica	Spessore della slice	Controlla l'estensione delle zone non raggiungibili
Obiettivo della segmentazione	Compatibilità con lavorazione a doppia faccia	Rende ciascuna sezione lavorabile da entrambe le facce
Esito operativo	Geometrie discrete trasferibili al CAM	Preparazione della fase Alphacam/Eureka

La segmentazione del volume rende quindi esplicito il principio metodologico che regge l'intero caso studio: la producibilità viene ottenuta ridefinendo la struttura operativa della materializzazione. Laddove il volume continuo risulta incompatibile con il regime sottrattivo, il framework non abbandona la configurazione selezionata, ma la riformula in una sequenza di slice lavorabili e assemblabili.

5.3.4 CAM, simulazione robotica offline e definizione della lavorazione a doppia faccia

Definita la segmentazione del modulo in 20 slice, la verifica di producibilità passa dal piano strettamente geometrico a quello operativo. Ciascuna sezione viene infatti trasferita in ambiente **CAM** come unità distinta di lavorazione, così che la compatibilità con la lavorazione a doppia faccia non sia soltanto dedotta dal controllo del sottosquadro, ma formalizzata in una sequenza esplicita di operazioni utensile, parametri di taglio e verifiche cinematiche. In questa fase il processo viene sviluppato in **Alphacam**, ambiente scelto per la generazione del percorso utensile e per la gestione di operazioni dedicate alla lavorazione. La logica produttiva è articolata in tre passaggi consecutivi: **rettifica** iniziale delle lastre ottenute dal blocco, **lavorazione a doppia faccia** della geometria e **rifilatura finale** dei bordi per ristabilire la squadratura delle facce laterali. Il filtro di producibilità si sposta così dalla sola accessibilità teorica alla definizione di un processo utensile effettivamente eseguibile.

Tabella 5.9

Parametri principali dello slicing e logica di segmentazione

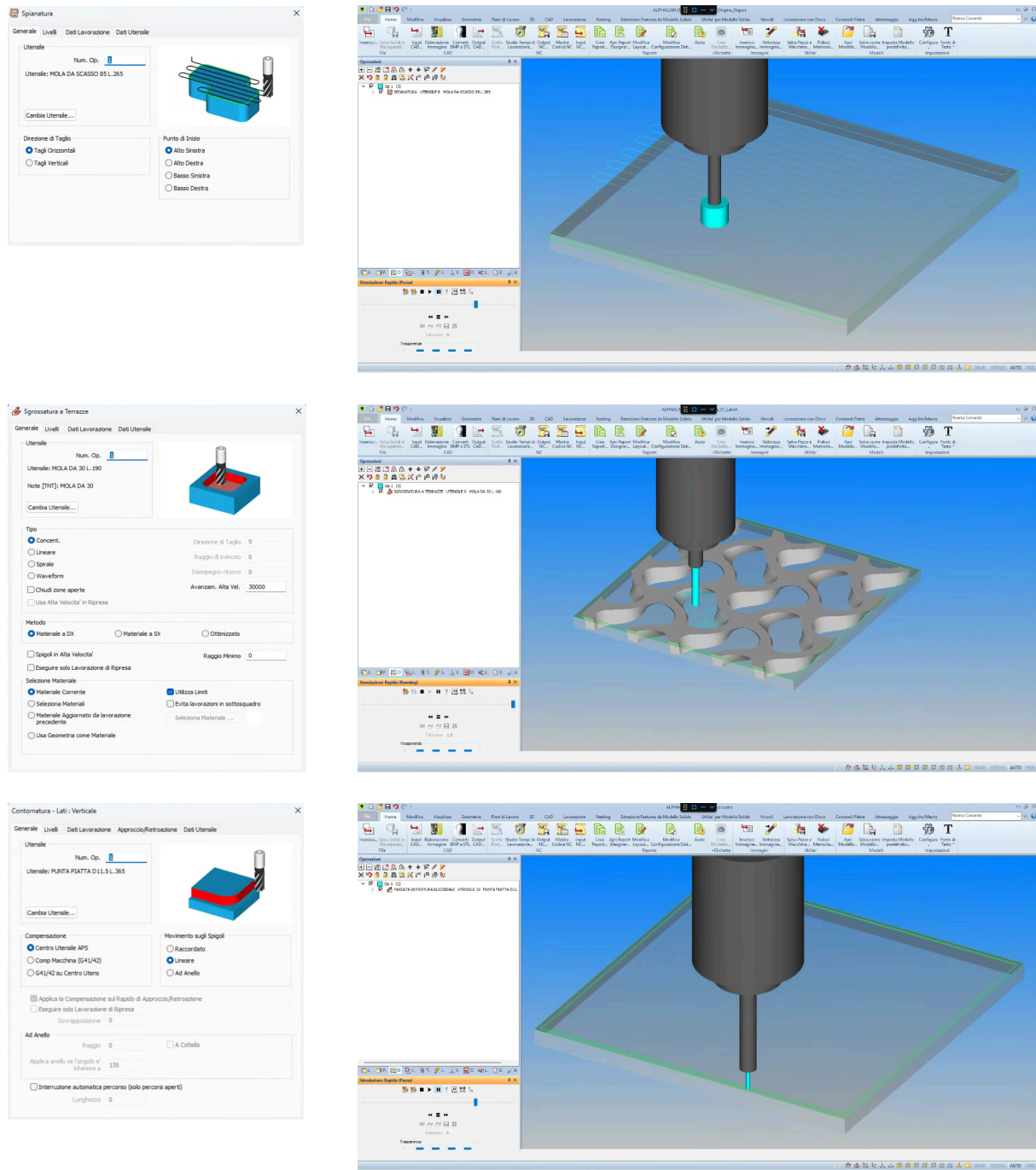


Figura 5.13

Pipeline sottrattiva: surfacing → z-contouring → path cut

La prima fase di lavorazione corrisponde al **surfacing**, necessaria a rettificare le superfici di taglio e a ottenere la co-planarità delle basi di appoggio. Solo dopo questa stabilizzazione geometrica ogni slice può essere lavorata come semiprodotto affidabile. La seconda fase è la **z-contouring**, impiegata prima sulla faccia superiore e poi, dopo il ribaltamento controllato della sezione, sulla faccia opposta,

così da generare progressivamente la morfologia del giroide. La terza fase è il **path cut**, che rimuove il materiale eccedente lungo il contorno e rifinisce i lati della slice dopo le operazioni di bloccaggio e fresatura. In ragione delle dimensioni della cella robotica, il setup consente di lavorare **cinque slice per ciclo**, aumentando l'efficienza del processo senza alterarne la logica.

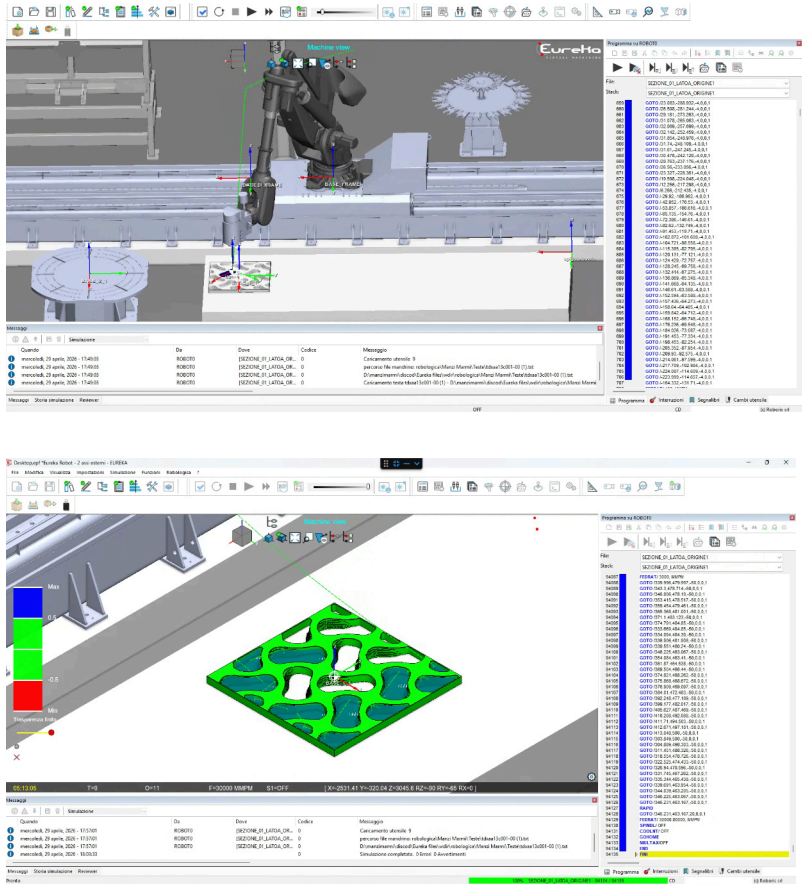


Figura 5.14 a-b

Simulazione robotica offline della lavorazione in Eureka

Operazione	Utensile	Z-depth	Feedrate	Spindle	Down feed	Funzione nel processo
Surfacing	End-mill Ø 85 mm	4 mm	2500 mm/min	5500 rpm	100 mm/min	Rettifica iniziale e ottenimento della co-planarità
Z-contouring	End-mill Ø 30 mm	2 mm	2000 mm/min	6000 rpm	100 mm/min	Fresatura della morfologia giroide sulle due facce
Path cut	End-mill Ø 10 mm	2 mm	2000 mm/min	5500 rpm	200 mm/min	Rifilatura finale e squadratura dei bordi

Tabella 5.10 – Operazioni CAM e parametri principali di lavorazione

La coerenza del CAM viene poi verificata in **Eureka**, dove i percorsi utensili generati vengono importati in una simulazione offline dell'intera cella. Questa comprende un **ABB IRB 8700** montato su **track da 6 m** e integrato con **rotary table**, configurazione che consente di gestire il posizionamento del materiale, la traiettoria uten-

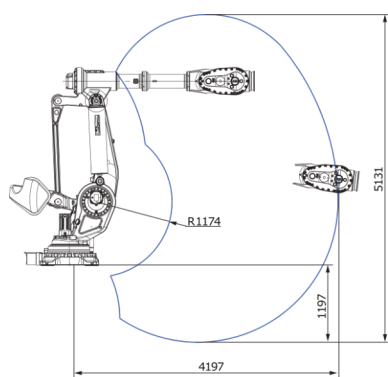


Figura 5.15

Setup della cella robotica con ABB IRB 8700, track e tavola rotante

sile e il ribaltamento richiesto dalla lavorazione a doppia faccia. In questo ambiente, la validazione riguarda la compatibilità cinematica dell'intero processo: posizionamento virtuale delle slice, importazione del percorso generato in Alphacam, definizione del punto iniziale dell'utensile, controllo delle collisioni tra robot, pezzo finito e componenti della cella, oltre alla verifica preventiva di eventuali condizioni di singolarità operativa. La **lavorazione a doppia faccia** si definisce quindi come strategia produttiva rigorosamente simulata, in cui il ribaltamento delle slice e la ripetizione della z-contouring sulla faccia opposta costituiscono la condizione necessaria per materializzare una geometria che resterebbe altrimenti incompatibile con la sola lavorazione monofaccia.

Su questa base, il caso sottrattivo mostra un passaggio ulteriore rispetto alla sola segmentazione: la lavorabilità del modulo è garantita dalla possibilità di tradurre ciascuna slice in una sequenza di operazioni coerente con utensili, macchina e cinematica della cella. La simulazione offline svolge quindi una funzione analoga a quella che la FEM aveva nel paragrafo 5.2, ma su un altro piano: valuta la fattibilità del processo di asportazione e il comportamento coordinato del sistema robotico. È solo a questo livello che la lavorazione a doppia faccia diventa un criterio effettivo di producibilità, aprendo la via alla fabbricazione reale e al successivo confronto tra mockup digitale e prototipo assemblato.

5.3.5 Fabbricazione, assemblaggio, scansione 3D e confronto digital mockup-prototipo

La fase conclusiva del caso studio consiste nella fabbricazione reale delle **20 slice**, nella loro ricomposizione in un unico modulo e nella

successiva verifica dello scarto tra geometria attesa e geometria ottenuta. In questa sezione la producibilità viene letta come capacità del processo di restituire un manufatto coerente con il digital mockup entro un campo di deviazione controllabile. La lavorazione a doppia faccia viene quindi assunta come condizione che introduce due possibili sorgenti di errore già riconoscibili nel prototipo: da un lato la presenza di **superfici a gradino** dovute alla discretizzazione del processo e alla successione dei passaggi della fresa robotizzata, dall'altro il possibile **disallineamento tra le due facce** di ciascuna slice, generato dal ribaltamento e dal riposizionamento durante la lavorazione.

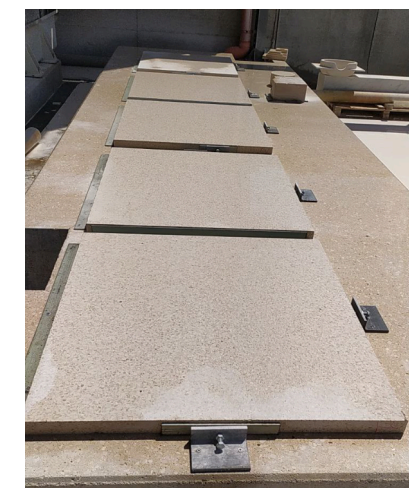
Una volta completata la fresatura, le slice vengono sottoposte a **ri-filatura** dei bordi e successivamente assemblate mediante adesivo polimerico, così da ricostruire il volume complessivo del modulo architettonico. In questa fase, la continuità morfologica finale dipende oltre che dalla precisione del percorso macchina, anche dalla qualità della ricomposizione tra le sezioni, dal mantenimento del parallelismo delle superfici di contatto e dalla corretta registrazione reciproca dei pezzi. Il manufatto assemblato costituisce quindi il punto di verifica materiale dell'intero caso sottrattivo: esso condensa in un unico oggetto gli effetti della segmentazione, della simulazione robotica, della lavorazione a doppia faccia e delle tolleranze accumulate nelle diverse fasi del processo. Per questo motivo la chiusura del caso richiede un confronto esplicito tra geometria digitale di progetto e geometria fisica effettivamente realizzata.

Il confronto viene condotto mediante **scansione 3D** del prototipo assemblato, successivo allineamento tra mesh rilevata e digital mockup di riferimento e calcolo della **geometry deviation** tra i due modelli. In termini operativi, la scansione produce una rappresentazione misurabile del manufatto, che viene registrata rispetto al modello teorico e trasformata in una mappa cromatica degli scarti. Questa operazione consente di distinguere le deviazioni distribuite in modo sistematico lungo le superfici, interpretabili come effetto della discretizzazione della lavorazione e delle superfici a gradino, dalle deviazioni localizzate in corrispondenza dei giunti o delle zone ribaltate, riconducibili invece a errori di riallineamento e assemblaggio. Il confronto scan-to-model deve quindi essere letto come verifica finale della lavorabilità effettiva del modulo: oltre a misurare "quanto il prototipo somiglia al modello", localizza dove e in quale entità il processo sottrattivo altera la morfologia prevista.

Nel quadro finale del caso studio, il confronto tra digital mockup e prototipo consente di trasformare la fabbricazione sottrattiva da semplice dimostrazione esecutiva a verifica sperimentale completa del framework. Se i dati di deviazione si mantengono entro un intervallo controllato $\pm 3 \text{ mm}$ per la maggior parte della superficie del

Figura 5.16 a-q

Sequenza di fabbricazione e assemblaggio delle slice del modulo Gyroid





modulo, il processo può essere considerato coerente con la morfologia prevista, pur in presenza di scarti localizzati nelle zone già individuate come critiche. Se invece gli scarti risultano concentrati e sistematici nelle superfici lavorate su doppia faccia o lungo i piani di ricomposizione, il confronto consente di identificare con precisione il punto della pipeline in cui intervenire: calibrazione del CAM, miglioramento del ribaltamento, ridefinizione delle superfici di appoggio, correzione del sistema di assemblaggio.

In questo senso, la scansione 3D restituisce al framework la sua piena natura iterativa: anche nel regime sottrattivo, la producibilità non coincide con l'avvenuta fabbricazione del modulo, ma con la possibilità di misurare, interpretare e correggere lo scarto tra forma generata e forma materializzata.

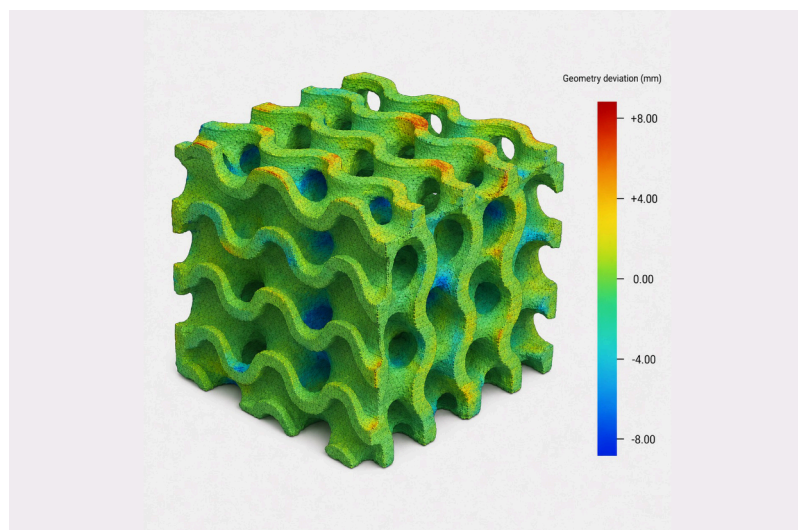


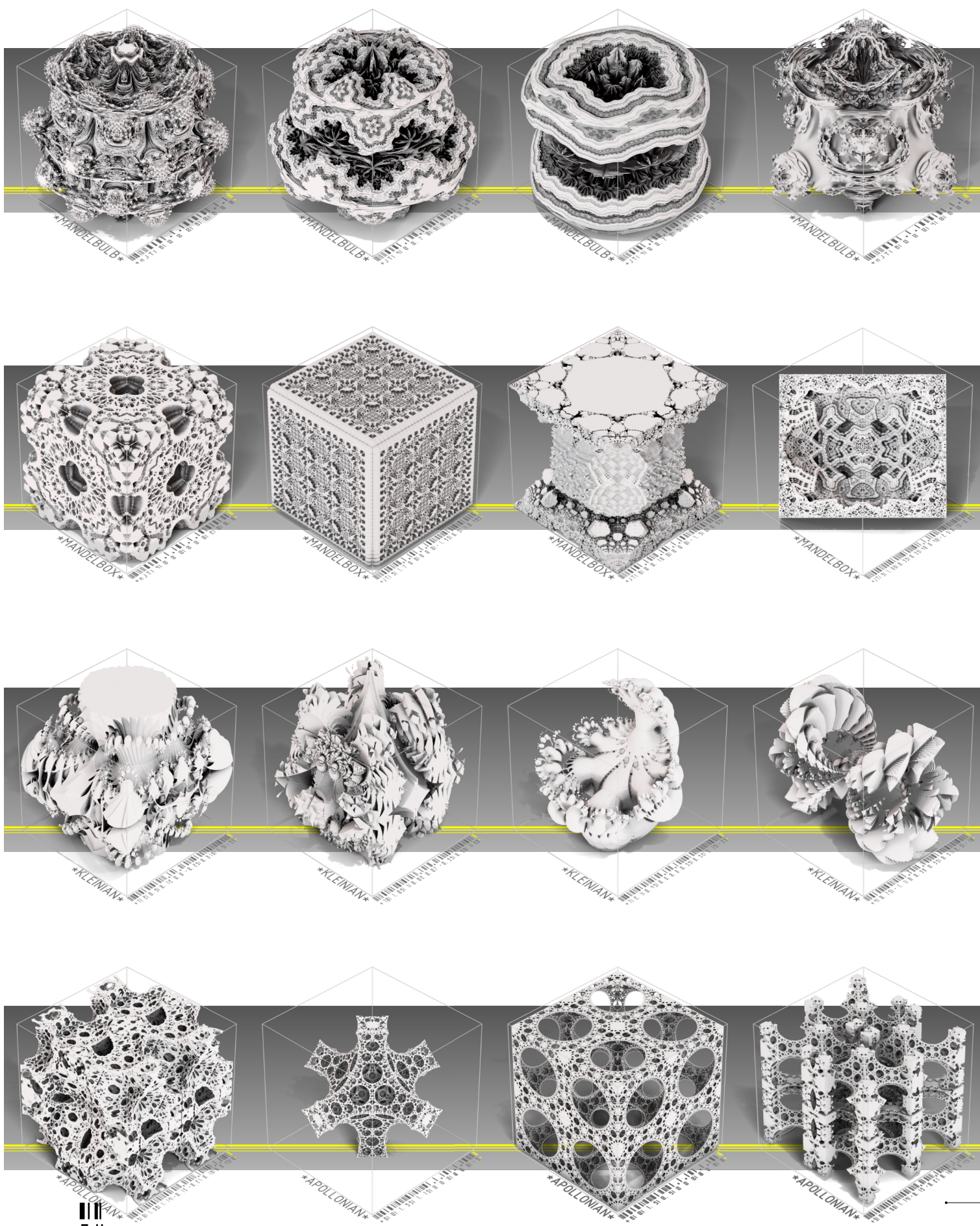
Figura 5.17 – Mappa cromatica della geometry deviation tra digital mockup e prototipo scansionato.



Figura 5.18 a/b

Manufatto finale assemblato





5.4 Applicazione del core algoritmico ai frattali

5.4.1 Inquadramento della famiglia frattale e continuità metodologica con il core

L'estensione del framework alla famiglia dei frattali costituisce il secondo passaggio dimostrativo del capitolo e verifica che il core algoritmico, già applicato alle TPMS, possa essere istanziato anche su morfologie governate da una logica generativa differente. La differenza riguarda quindi la natura del principio generativo, non la struttura metodologica generale: anche in questo secondo dominio, il core continua a operare come dispositivo di formalizzazione, parametrizzazione e selezione di configurazioni candidate.

Il paragrafo assume come oggetto un insieme di famiglie frattali generate attraverso la medesima impalcatura implementativa: **Mandelbulb**, **Mandelbox**, **Apollonian** e **Kleinian**. In tutti i casi, la continuità con il framework è data dalla possibilità di ricondurre regole generative eterogenee a una medesima logica operativa: definizione della procedura, controllo parametrico, discretizzazione volumetrica e produzione di una mesh interrogabile in funzione della successiva materializzazione. Il passaggio dalle TPMS ai frattali non introduce dunque un secondo sistema autonomo, ma amplia il dominio di applicazione del medesimo modello.

All'interno di questo insieme, il **Mandelbulb** assume da subito un ruolo particolare, perché rappresenta il caso in cui la transizione dal paradigma bidimensionale del Mandelbrot a una costruzione tridimensionale risulta più leggibile sia sul piano matematico sia su quello morfologico. La sua formulazione più nota nasce infatti dall'estensione dell'iterazione in coordinate sferiche, dove il raggio viene elevato a una potenza e gli angoli vengono moltiplicati secondo la stessa logica, generando una famiglia di frattali tridimensionali ad alta articolazione locale; nelle visualizzazioni più comuni, la potenza 8 costituisce una scelta tradizionale. Questa struttura lo rende particolarmente adatto al ruolo di caso guida: rispetto alle altre famiglie considerate, il Mandelbulb rende più evidente la presenza simultanea di cavità, sottosquadri, perforazioni e dettagli gerarchici, cioè proprio quei caratteri che diventeranno decisivi nel successivo passaggio alla validazione produttiva.

In questa prospettiva, il paragrafo 5.4 oltre a sviluppare una tassonomia esaustiva dei frattali, ha il compito di mostrare che anche una famiglia morfogenetica non periodica, non minima e fortemente gerarchica può essere ricondotta a uno spazio di configurazioni controllabili. La funzione del presente inquadramento è precisamente questa: delimitare il campo delle famiglie trattate e pre-

Figura 5.19

Quadro sinottico delle famiglie frattali generate dal core

Tabella 5.11

Famiglie frattali considerate e relative caratteristiche morfologiche

parare la sezione successiva, nella quale la complessità frattale verrà esplicitata come insieme di regole iterative traducibili nello stesso impianto operativo già verificato sulle TPMS. In tal modo, la continuità con il core non viene dichiarata in astratto, ma resa metodologicamente osservabile come passaggio da una famiglia morfogenetica all'altra senza alterazione della struttura del framework.

Famiglia	Principio generativo prevalente	Caratteri morfologici dominanti	Ruolo nel paragrafo
Mandelbulb	Iterazione tridimensionale in coordinate sferiche	Lobi, cavità, sottosquadri, articolazione gerarchica	Caso guida per la validazione produttiva
Mandelbox	Trasformazioni iterative con pieghe e scale	Volumi spigolosi, ripetizione modulare, forte auto-similarità	Termine di confronto morfologico
Apollonian	Riempimento ricorsivo di cavità / packing frattale	Cavità nidificate, porosità diffusa, organizzazione radiale	Termine di confronto morfologico
Kleinian	Iterazione frazionale / trasformazioni conformi ricorsive	Complessità diffusa, perforazioni e ramificazione spaziale	Termine di confronto morfologico

5.4.2 Formalizzazione operativa dei frattali come sistemi iterativi ricorsivi

Nel dominio frattale, la forma è descritta da una **regola iterativa** che trasforma ripetutamente un punto dello spazio e ne valuta la permanenza entro una soglia di convergenza o di fuga. Il principio costruttivo del **Mandelbulb** può essere letto come estensione tridimensionale della logica mandelbrotiana: dato un vettore nello spazio, esso viene convertito in coordinate sferiche, il raggio viene elevato a una potenza n, gli angoli vengono moltiplicati per la stessa potenza, e il punto così trasformato viene poi ricondotto nello spazio cartesiano e sommato al termine iniziale; la morfologia emerge dall'insieme dei punti per cui l'orbita dell'iterazione resta limitata. In questa prospettiva, la ricorsione svolge per i frattali il ruolo che la funzione implicita svolgeva per le TPMS: non rappresenta un procedimento accessorio di generazione, ma la regola formale da cui discende l'intera organizzazione morfologica.

La formulazione più comune del Mandelbulb utilizza quindi le coordinate sferiche (r,θ,φ) per definire la potenza tridimensionale del vettore, secondo una logica del tipo (r,θ,φ)^n=(r^n,nθ,nφ) riportata in forma cartesiana, questa trasformazione produce i lobi, le cavità e i dettagli gerarchici che caratterizzano la famiglia. Le fonti matematiche sul Mandelbulb sottolineano inoltre due aspetti rilevanti per la presente tesi: primo, che non esiste un analogo canonico tridimensionale dei numeri complessi, e che il Mandelbulb è quindi una costruzione operativa basata su una definizione di “potenza” nello spazio tridimensionale; secondo, che la scelta della **potenza 8**

è diventata una convenzione particolarmente diffusa, poiché per n>3 emergono in modo stabile la struttura bulbosa e il sistema di lobi che rendono il frattale morfologicamente leggibile. Questi due elementi spiegano bene perché, nel passaggio dalla teoria all'implementazione, la famiglia frattale richieda una formalizzazione procedurale più che una semplice trascrizione analitica.

Nel setup implementativo fornito, questa logica viene tradotta in una catena operativa compatta. Il nodo **Position** fornisce il punto iniziale del dominio spaziale; tale posizione viene scalata e inviata in cascata a n-gruppi successivi “**Mandelbulb formula**”, così da esplicitare iterativamente la trasformazione del vettore nello spazio. All'interno del gruppo, la regola è costruita proprio secondo la struttura teorica della formula: calcolo della lunghezza del vettore r separazione delle componenti cartesiane, ricostruzione degli angoli mediante **Arctan2** e **Arcsine**, elevazione del raggio a potenza mediante **Power**, moltiplicazione degli angoli e successiva ricomposizione cartesiana tramite funzioni trigonometriche e **Combine XYZ**. Il vettore trasformato viene poi sommato alla posizione di partenza, rispettando la forma ricorsiva $zk+1 = f(zk) + c$ In questo modo, il node setup implementa direttamente la regola generativa frattale come procedura spaziale ripetibile.

Famiglia frattale	Formulazione / regola generativa sintetica	Parametri principali
	$z_{k+1} = F_n(z_k) + c$ con trasformazione in coordinate sferiche: $r' = r^n, \theta' = n\theta, \phi' = n\phi$ e riconversione cartesiana: $x' = r^n \sin(n\phi) \cos(n\theta)$ $y' = r^n \sin(n\phi) \sin(n\theta)$ $z' = r^n \cos(n\phi)$	
Mandelbulb		potenza (n), numero di iterazioni, soglia di fuga, risoluzione volumetrica
Mandelbox	$v_{k+1} = s \cdot \text{ballFold}(r, f \cdot \text{boxFold}(v_k)) + c$	scale (s), raggio del ball fold (r), fold factor (f), numero di iterazioni
Apollonian	$x' = c + \frac{R^2(x-c)}{\ x-c\ ^2}$	numero di iterazioni, configurazione iniziale, raggio / posizione delle sfere o cavità generatrici
Kleinian	$T(z) = \frac{az+b}{cz+d}$	coefficienti della trasformazione, numero di iterazioni, dominio iniziale, eventuali soglie di arresto

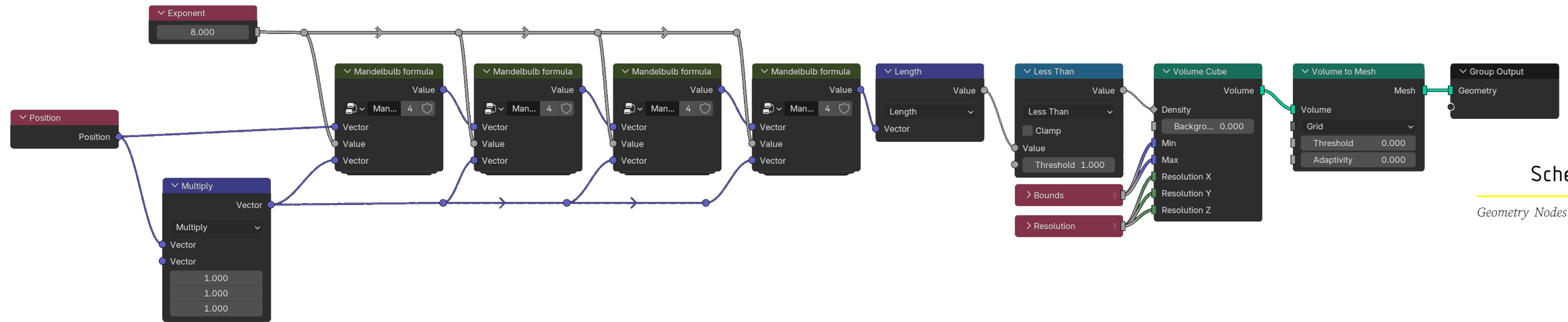
Tabella 5.12 – Regole generative e formalizzazione operativa delle famiglie frattali considerate.

La chiusura della procedura avviene attraverso una discretizzazione volumetrica coerente con l'intero framework. Dopo l'ultima iterazione, il modulo della posizione risultante viene confrontato con una soglia tramite **Less Than**; l'esito binario alimenta un **Volume Cube**, successivamente convertito in mesh mediante **Volume to Mesh**. Anche qui, dunque, la famiglia frattale viene ricondotta alla stessa architettura operativa già verificata per le TPMS: definizione della regola, valutazione sul dominio spaziale, estrazione di una configurazione morfologica discretizzata e producibile come mesh. Le formulazioni generative delle altre famiglie considerate — **Mandelbox**, **Apollonian**, e **Kleinian** — sono sintetizzate in **Tabella 5.14**, che ne esplicita la regola iterativa, i parametri principali e la relativa



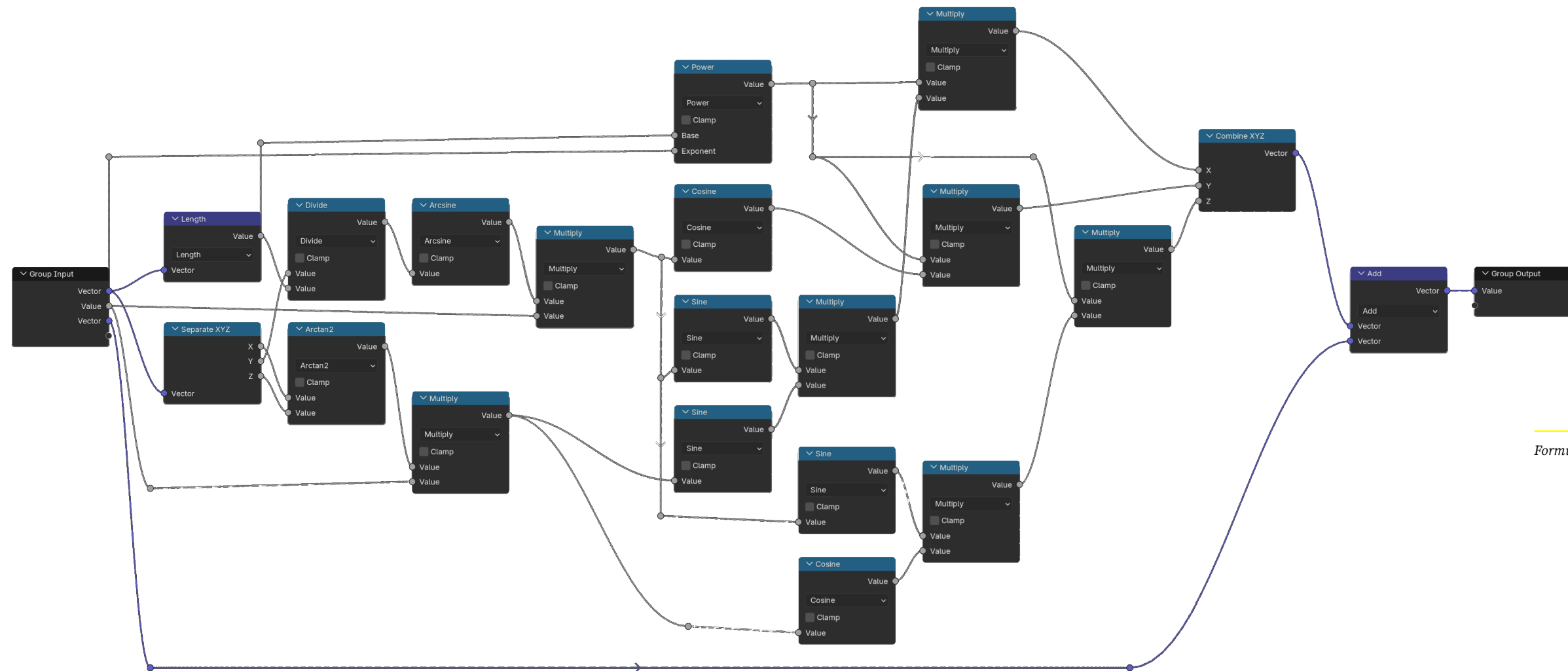
Figura 5.20

Processo generativo del frattale di Mandelbrot



Schema 5.9-a

Geometry Nodes setup del Mandelbulb



Schema 5.9-b

Formula del Mandelbulb in Geometry Nodes setup

traduzione operativa entro il medesimo schema metodologico fondato su iterazione, soglia e discretizzazione.

5.4.3 Parametrizzazione numerica e costruzione dello spazio delle varianti frattali

La trasferibilità del core alla famiglia frattale non si esaurisce nella sola implementazione della regola iterativa, ma richiede che tale regola venga ricondotta a uno **spazio parametrico controllabile**. Anche in questo caso, infatti, il framework opera per costruzione di un dominio di varianti entro il quale la morfologia può essere regolata, confrontata e successivamente selezionata in funzione della validazione produttiva. Nel caso dei frattali, questa operazione è particolarmente rilevante, perché la complessità locale della forma non dipende soltanto dalla famiglia scelta, ma anche dall'interazione tra numero di iterazioni, esponente della trasformazione, soglie di valutazione e risoluzione del dominio campionato. La parametrizzazione rende osservabile la capacità logica del core di governare gradienti di complessità molto diversi all'interno della stessa classe morfogenetica.

Nel **Mandelbulb**, il parametro più evidente è la **potenza n** applicata alla trasformazione del vettore in coordinate sferiche, che controlla direttamente il numero e la configurazione dei lobi, la distribuzione delle cavità e il grado di articolazione del bordo. A questo si aggiunge il **numero di iterazioni** con cui la trasformazione viene esplicitata nello scaffold: nel setup qui adottato, la ricorsione è resa operativa attraverso una catena di blocchi successivi "Mandelbulb formula", mentre la classificazione finale del dominio dipende da una **soglia** applicata al modulo del vettore trasformato. Questi parametri agiscono congiuntamente: aumentando la potenza o il numero di iterazioni cresce la complessità locale e si moltiplicano cavità e sottosquadri; aumentando la risoluzione cresce invece la capacità del sistema di trattenere dettagli minuti, al prezzo di una maggiore densità informazionale e di una più difficile traducibilità produttiva.

La stessa logica si estende alle altre famiglie considerate, pur con differenze nella natura delle trasformazioni dominanti. Nel **Mandelbox** la variazione parametrica agisce soprattutto sulle operazioni di fold e scale, producendo configurazioni più o meno compatte, spigolose o perforate; nell'**Apollonian** il controllo si concentra sulla profondità del packing ricorsivo e sulla densità delle cavità annidate; nel **Kleinian** la complessità dipende dall'intensità e dalla ripetizione delle trasformazioni conformi o inversioni che strutturano il campo. In tutti i casi, la parametrizzazione produce una conseguenza metodologicamente decisiva: non tutte le configurazioni generate hanno lo stesso valore rispetto alla fase successiva. Alcune varianti restano utili come esplorazione morfologica, altre diventa-

no candidate alla materializzazione perché rendono espliciti, in modo più netto, i limiti dei regimi produttivi diretti.

Parametro	Ambito di applicazione	Effetto morfologico prevalente	Implicazione per la validazione produttiva
Potenza / esponente della trasformazione	Soprattutto Mandelbulb	Numero dei lobi, intensità della torsione, articolazione locale della superficie	Aumento di cavità, sottosquadri e dettagli minuti
Numero di iterazioni	Tutte le famiglie	Profondità gerarchica, densità del dettaglio, complessità del bordo	Crescita della complessità locale e riduzione della producibilità diretta
Soglia di valutazione / fuga	Tutte le famiglie	Delimitazione del dominio frattale e compattezza della configurazione	Variazione del rapporto tra pieni, vuoti e continuità della forma
Parametri di scala / fold / inversione	Mandelbox, Kleinian, Apollonian	Compattazione, ramificazione, apertura o chiusura delle cavità	Modifica dell'accessibilità e della leggibilità della geometria
Risoluzione volumetrica	Tutte le famiglie	Finezza della discretizzazione e precisione dell'estrazione della mesh	Migliore definizione formale, ma maggiore onere computazionale e produttivo

Tabella 5.13 – Parametri principali e loro effetti morfologici

Ne deriva che lo spazio delle varianti frattali coincide con un **campo di configurazioni differenziate** che può essere interrogato secondo criteri progressivamente più selettivi. La parametrizzazione permette cioè di distinguere tra varianti solo formalmente interessanti e varianti capaci di rendere leggibile il problema della produzione. È precisamente su questo passaggio che il paragrafo 5.4 assume il proprio ruolo di ponte: la famiglia frattale viene resa controllabile abbastanza da consentire una scelta motivata del caso guida.

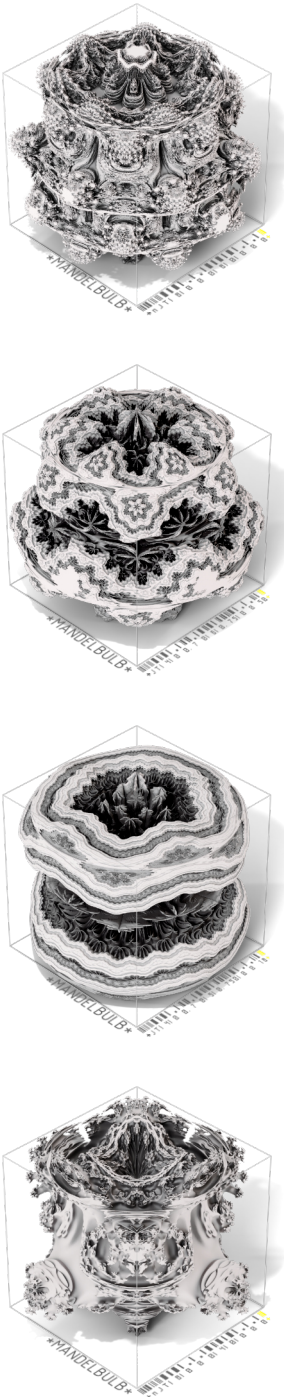
La sezione seguente selezionerà quindi il **Mandelbulb** come configurazione di riferimento: la sua struttura rende particolarmente evidente il rapporto tra complessità morfologica e limite produttivo, prescindendo da una preferenza figurativa isolata.

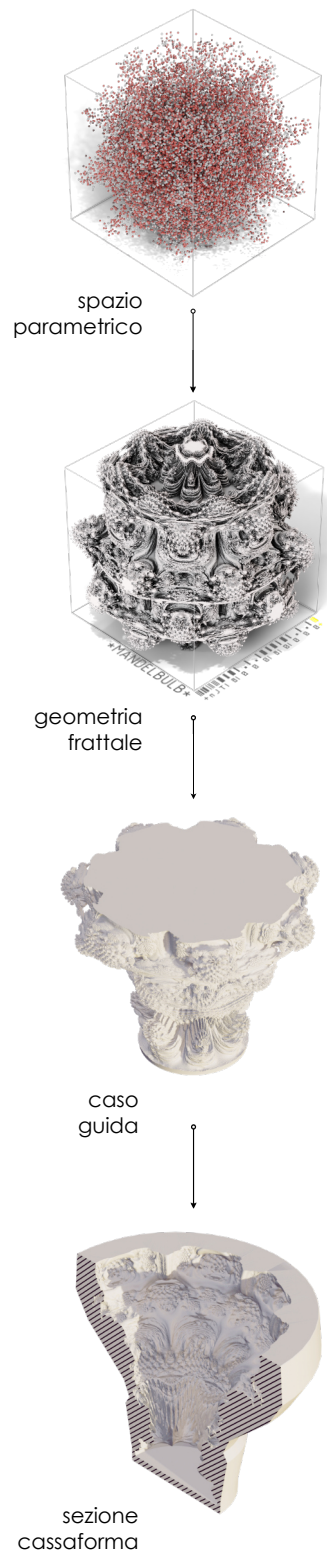
5.4.4 Selezione del Mandelbulb come caso guida per la validazione produttiva

La selezione del **Mandelbulb** come caso guida del blocco frattale risponde a una logica strettamente metodologica. All'interno dello spazio delle varianti costruito nella sezione precedente, esso è la configurazione che rende più chiaramente leggibile il rapporto tra complessità geometrica e limite produttivo, poiché concentra in una stessa struttura alcuni caratteri critici che i regimi diretti incontrano con particolare evidenza: **fori passanti, cavità profonde, sottosquadri marcati, variazioni locali di spessore e dettaglio gerarchico ad alta frequenza**. In questo senso, il Mandelbulb viene

Figura 5.21

Varianti frattali generate attraverso la parametrizzazione numerica





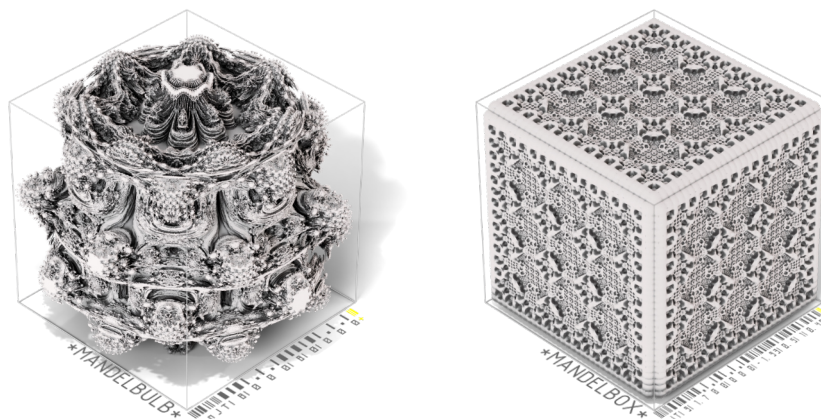
Schema 5.10

Dallo spazio parametrico delle varianti frattali alla selezione del caso guida

scelto come configurazione capace di portare il framework verso una soglia di complessità nella quale la sola generazione algoritmica non basta più a garantire la traducibilità materiale della forma. La sua funzione è quindi analoga a quella svolta dal giroide nel blocco TPMS, ma con una differenza sostanziale: qui il caso guida serve a mettere in evidenza una condizione-limite in cui la complessità locale della geometria diventa il vero problema della materializzazione.

Il confronto con le altre famiglie chiarisce ulteriormente questa scelta. Il **Mandelbox** produce configurazioni fortemente auto-simili e spazialmente articolate, ma tende a esibire una logica volumetrica più spigolosa e modulare; l'**Apollonian** organizza il vuoto in forme nidificate e porose, ma con una leggibilità strutturale diversa; il **Kleinian** genera geometrie diffuse e perforate, ma con una distribuzione meno immediatamente riconducibile a un elemento architettonico leggibile. Il Mandelbulb, invece, presenta una combinazione particolarmente efficace di **centralità volumetrica, ramificazione periferica, perforazione interna e continuità superficiale**, tale da renderlo simultaneamente una morfologia frattale ad alta densità informazionale e un candidato plausibile alla trasposizione in un elemento architettonico. Il richiamo all'**immaginario gotico** non ha qui un valore ornamentale accessorio, ma agisce come indicatore morfologico: verticalità, articolazione nervata, profondità delle cavità e tensione tra massa e perforazione lo rendono particolarmente adatto alla successiva reinterpretazione come capitello.

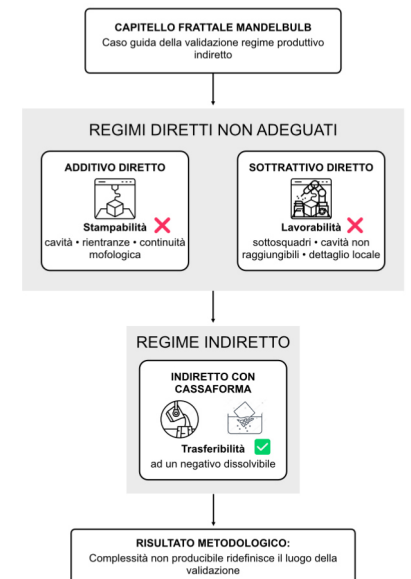
La scelta del Mandelbulb prepara quindi in modo diretto il passaggio al paragrafo successivo. Tra le configurazioni considerate, mostra con maggiore evidenza l'insufficienza dei filtri di producibilità già incontrati nei regimi diretti: una geometria di questo tipo non risulta facilmente compatibile né con la stabilità della fabbricazione additiva né con i vincoli di accessibilità della fabbricazione sottrattiva a doppia faccia, proprio a causa della compresenza di cavità interne, rientranze profonde e dettaglio locale molto spinto. Per



questo il Mandelbulb viene assunto come base del **capitello frattale**, cioè come configurazione nella quale il framework è costretto a ridefinire nuovamente il luogo della validazione e a spostare la materializzazione entro un regime indiretto.

Criterio	Mandelbulb	Rilevanza per la validazione
Presenza di cavità e perforazioni	Alta	Rende evidente il limite dei regimi diretti
Intensità dei sottosquadri	Alta	Introduce condizioni critiche per stampa e lavorazione diretta
Dettaglio gerarchico locale	Alto	Espone il problema della fedeltà geometrica in produzione
Continuità della morfologia complessiva	Alta	Consente la trasposizione a un elemento architettonico unitario
Leggibilità figurativa	Alta	Favorisce il passaggio al capitello frattale
Capacità di rappresentare un caso-limite	Alta	Giustifica il passaggio al regime indiretto

Tabella 5.14: Criteri di selezione del caso guida per la validazione produttiva



Schema 5.11

Passaggio di regime: dalla non-producibilità diretta alla mediazione tramite cassaforma sacrificabile

5.5 Capitello frattale in fabbricazione indiretta tramite cassaforma

5.5.1 Impostazione del caso studio indiretto e motivazione del cambio di regime produttivo

Il capitello frattale costituisce la terza verifica produttiva del framework e introduce un passaggio metodologico ulteriore rispetto ai casi precedenti. Se nel paragrafo 5.2 la materializzazione del modulo TPMS era stata verificata entro un regime additivo diretto e nel paragrafo 5.3 entro un regime sottrattivo diretto, nel presente caso

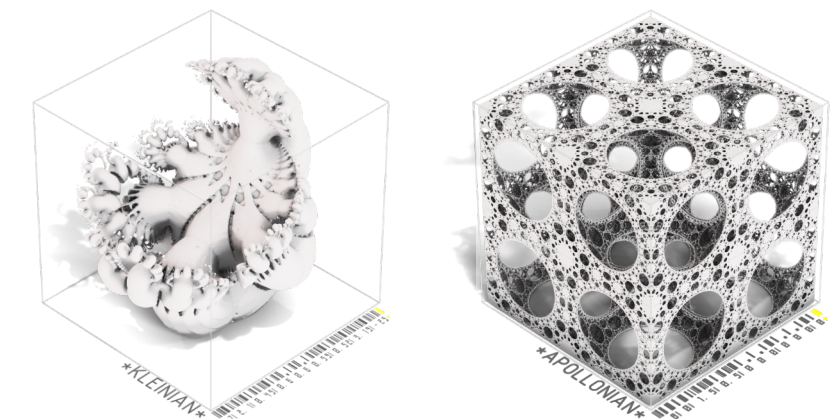
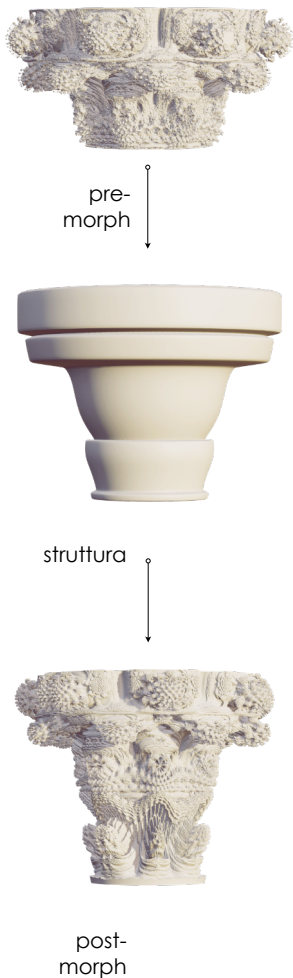


Figura 5.22

Confronto tra le famiglie frattali considerate e selezione del Mandelbulb come caso guida



Schema 5.12

Configurazione Mandelbulb selezionata come base del capitello frattale

la morfologia selezionata viene trattata come configurazione che richiede una mediazione produttiva intermedia. Il cambiamento di regime dipende dall’insufficienza dei filtri di producibilità propri dei regimi diretti quando applicati a una geometria frattale ad alta articolazione locale. Il caso studio va quindi letto come applicazione esplicita della logica multi-regime formalizzata nel Capitolo 4: a parità di struttura generativa, cambia il contesto operativo entro cui la forma può essere materializzata.

La morfologia del capitello, derivata dal **Mandelbulb** selezionato nel paragrafo precedente, concentra infatti una serie di caratteri geometrici che rendono problematica la fabbricazione diretta del manufatto finale. La presenza simultanea di varie complessità geometriche impedisce di ricondurre il caso ai criteri già adottati nei due regimi precedenti. Da un lato, una configurazione di questo tipo non risulta compatibile con una logica di stampabilità analoga a quella del paragrafo 5.2, perché la continuità della forma e la densità dei rientri rendono impraticabile una verifica fondata sulla sola deposizione diretta del manufatto finale. Dall’altro, la stessa geometria non è riconducibile a una lavorazione sottrattiva diretta comparabile a quella del paragrafo 5.3, poiché l’accessibilità utensile e la lavorazione a doppia faccia non risultano sufficienti a risolvere la complessità dei sottosquadri e delle cavità senza alterare in modo sostanziale la continuità morfologica del modello. Il passaggio a un regime indiretto non rappresenta quindi una deviazione dal framework, ma la conseguenza metodologica dell’emergere di una condizione di non-producibilità nei regimi diretti.

La risposta produttiva adottata consiste nella trasformazione del mockup digitale del capitello in una **cassaforma negativa in PVA idrosolubile**, stampata additivamente e utilizzata come involucro sacrificabile per la successiva colata del materiale finale. Questo aspetto è decisivo, perché ridefinisce il luogo stesso della validazione. Nei casi precedenti, il filtro di producibilità agiva direttamente sul manufatto finale; nel caso del capitello frattale, invece, la verifica riguarda la sua **trasferibilità a un sistema negativo dissolvibile**, capace di aggirare i vincoli del disarmo tradizionale. La cassaforma non viene infatti progettata come stampo apribile o scomponibile secondo linee di sformo, ma come **copia negativa integrale** della geometria finale, destinata a essere eliminata per dissoluzione. Il PVA introduce così una mediazione produttiva radicalmente diversa da quella dei regimi diretti, consentendo la restituzione materiale proprio perché accetta il sacrificio del supporto intermedio.

In questa prospettiva, il capitello frattale occupa una posizione strategica nella dimostrazione complessiva del capitolo 5: esso serve ad esplicitare il punto in cui i criteri di validazione impiegati nei regimi diretti cessano di essere sufficienti. Il caso studio delimita così una

frontiera operativa del framework: la producibilità non coincide più con la fabbricazione diretta della forma, ma con la capacità di trasferirne la complessità a un dispositivo intermedio che ne consenta la materializzazione.

Regime produttivo	Filtro di producibilità dominante	Criticità rispetto al capitello frattale	Esito metodologico
Additivo diretto	Stampabilità del manufatto finale	Cavità, rientranze e continuità morfologica non compatibili con una logica di deposizione diretta controllabile	Regime non adeguato
Sottrattivo diretto	Accessibilità utensile e lavorabilità della geometria	Sottosquadri profondi, cavità non raggiungibili e dettaglio locale incompatibile con lavorazione doppia faccia	Regime non adeguato
Indiretto tramite cassaforma	Trasferibilità della forma a un negativo sacrificabile	La complessità viene mediata dalla cassaforma e liberata per dissoluzione	Regime adottato

5.5.2 Traduzione del mockup digitale in cassaforma negativa in PVA

Assunta come già definita nel paragrafo precedente la configurazione del capitello frattale derivata dal Mandelbulb, il primo passaggio operativo del regime indiretto consiste nella sua trasformazione da modello positivo finale a **cassaforma negativa stampabile**. In questa fase, il problema non è più la generazione della morfologia, ma la sua inversione geometrica in un involucro capace di accoglierne integralmente il volume per successiva colata. La mediazione produttiva introdotta dal PVA modifica quindi il rapporto tra forma e processo: il manufatto finale non viene fabbricato direttamente, ma viene prima convertito in un negativo che ne conserva cavità, aggetti, perforazioni e dettagli superficiali. Il criterio di producibilità, in questo passaggio, coincide con la possibilità di trasferire il mockup a una geometria intermedia sufficientemente continua, stampabile e idonea a contenere il getto senza perdere la complessità del modello di partenza.

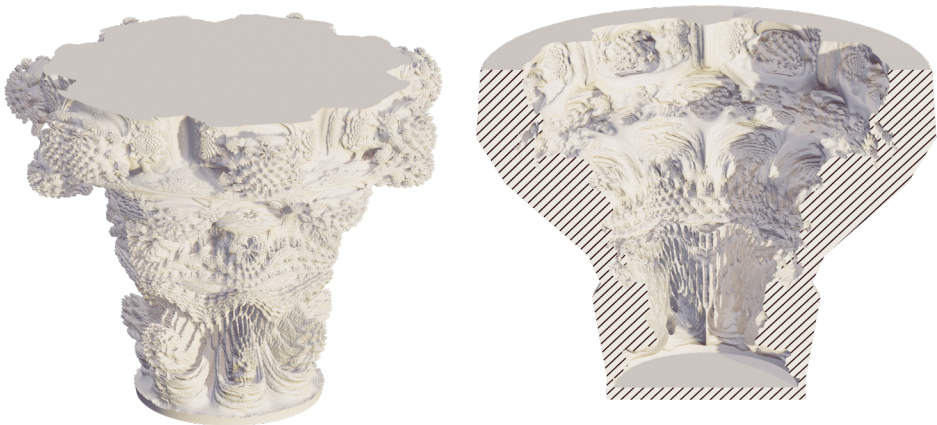
A differenza di una cassaforma tradizionale, il negativo non è progettato come sistema di sformo meccanico articolato secondo linee di apertura, giunti di smontaggio o logiche di estrazione progressiva. La sua logica è invece quella della **copia negativa integrale** del capitello, resa possibile dal carattere sacrificabile e idrosolubile del PVA. Questo aspetto è metodologicamente decisivo: la complessità della forma viene trasferita quasi letteralmente a un involucro che può essere eliminato per dissoluzione dopo la maturazione del getto. La cassaforma funziona quindi come dispositivo di traduzione morfologica, non come filtro semplificativo della forma; essa consente di mantenere continuità tra mockup digitale e volume colato

Tabella 5.15

Limiti dei regimi diretti e motivazione del passaggio al regime indiretto

Figura 5.22

Modello digitale del capitello frattuale e relativo negativo in PVA



proprio perché sospende il vincolo, centrale nei sistemi tradizionali, della reversibilità meccanica dello stampo.

Il passaggio da positivo a negativo richiede tuttavia una serie di decisioni geometriche e costruttive che ne definiscono la trattabilità produttiva. Il primo parametro riguarda la **consistenza geometrica della parete in PVA**, che nel presente caso, anziché attestarsi su valori uniformi, varia localmente in funzione della complessità del negativo; per questo la cassaforma risulta più correttamente descrivibile come involucro a spessore variabile, eventualmente quantificabile attraverso il suo volume complessivo o attraverso valori minimi, massimi e medi ricavati dal modello digitale. Il secondo parametro concerne l'**orientamento di stampa**, che coincide con l'assetto verticale del capitello e mantiene quindi continuità diretta tra configurazione del mockup e configurazione dello stampo. Il terzo riguarda il **sistema di colata**, impostato dall'alto attraverso l'apertura superiore del negativo, che svolge simultaneamente anche la funzione di sfogo dell'aria, senza richiedere un sistema di sfiao separato. Anche se la cassaforma nasce come copia del manufatto finale, la sua efficacia dipende dunque da una serie di condizioni geometriche non del tutto equivalenti a quelle del modello positivo: stampabilità del guscio, continuità del volume negativo e capacità del sistema di restituire i dettagli significativi della morfologia frattuale.

In questa prospettiva, la cassaforma in PVA è il vero luogo in cui la non-producibilità diretta del capitello viene riformulata in una nuova catena di compatibilità produttive. Il mockup digitale viene infatti reso trattabile perché la sua complessità viene trasferita a un involucro la cui eliminazione è già inscritta nel processo stesso.

5.5.3 Parametri di slicing, stampa del PVA e preparazione della cassaforma

Una volta definita la geometria negativa del capitello, la verifica di producibilità del regime indiretto si trasferisce sul piano della **stampabilità della cassaforma**. In questa fase, il problema coincide

con la possibilità di realizzare in PVA un involucro sufficientemente stabile da contenere il getto e sufficientemente fedele da trasferire la complessità del mockup digitale. La cassaforma è quindi un dispositivo produttivo autonomo, con vincoli propri di slicing, deposizione e continuità materiale. Il passaggio è metodologicamente rilevante perché sposta la producibilità dalla forma finale al sistema intermedio che ne consente la materializzazione: nel regime indiretto la condizione di stampabilità si sposta dal capitello al suo negativo sacrificabile, che diviene il vero oggetto della validazione produttiva.

Parametro	Valore / impostazione	Ruolo nel caso studio
Tipo di cassaforma	Negativo sacrificabile in PVA	Mediazione produttiva tra mockup digitale e manufatto colato
Logica costruttiva	Copia negativa integrale del capitello	Trasferimento diretto della complessità morfologica
Geometria di riferimento	Capitello frattuale derivato dal Mandelbulb	Modello positivo da invertire
Spessore della parete	Variabile, non uniforme	Adattamento locale alla complessità geometrica del negativo
Volume complessivo della cassaforma	0.00093 m³	Quantificazione sintetica del negativo stampato
Orientamento di stampa	Verticale, coincidente con l'assetto del capitello	Continuità geometrica tra mockup e cassaforma stampata
Numero di parti della cassaforma	1	Realizzazione del negativo come involucro unitario
Sistema di colata	Apertura superiore / colata dall'alto	Immissione del materiale nel volume negativo
Sistema di sfiao	Assente come elemento separato; sfogo garantito dall'apertura superiore	Uscita dell'aria durante la colata

La cassaforma è stata stampata in PVA su **Ultimaker S5** con **ugello BB da 0.8 mm**, assumendo un assetto **verticale coincidente con l'orientamento del capitello** e una configurazione costruttiva in **pezzo unico**. Dal G-code di slicing risultano **509 layer**, con **altezza massima di stampa pari a 152.93 mm**, **layer height standard di 0.30 mm** e **quota del primo layer pari a 0.53 mm**. La deposizione è stata impostata con **temperatura dell'estrusore di 230 °C** e **piano a 60 °C**, valori coerenti con la necessità di mantenere regolare l'estrusione del PVA e sufficiente l'adesione iniziale al piano. Il setup include inoltre **wall line count = 2**, **infill pattern Gyroid al 10%**, **brim di 5 linee**, **retraction speed di 20 mm/s** e **retraction hop attivo**. In questa configurazione, il tempo complessivo stimato di fabbricazione della cassaforma è pari a **115924 s**, cioè circa **32 h 12 min**, dato che rende immediatamente leggibile l'onere operativo richiesto dalla mediazione negativa del processo.

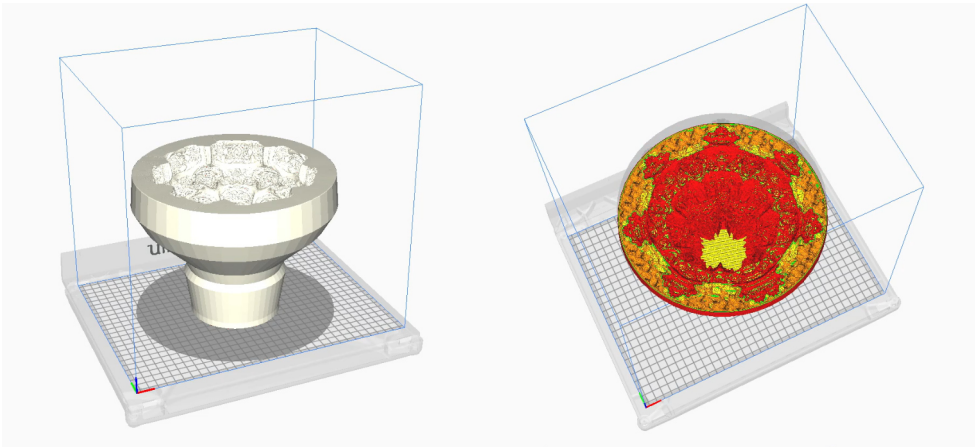
Sul piano materiale, il PVA svolge una funzione duplice e strategica: durante la stampa deve mantenere integrità sufficiente a restituire

Tabella 5.16

Parametri geometrici principali della cassaforma

Figura 5.23

Screenshot di slicing della cassaforma in PVA



il negativo del capitello, mentre dopo la colata deve poter essere eliminato per dissoluzione senza richiedere operazioni di disarmo meccanico. La sua rilevanza, in questo caso, risiede nel fatto che la stessa materia che garantisce la costruzione del negativo è anche

Tabella 5.17

Parametri di stampa della cassaforma in PVA

Parametro	Valore / impostazione	Funzione nel processo
Stampante	Ultimaker S5	Fabbricazione additiva della cassaforma negativa
Materiale di stampa	PVA	Realizzazione della cassaforma sacrificabile idrosolubile
Nozzle	BB 0.8 mm	Deposizione del materiale con portata elevata
Temperatura estrusore	230 °C	Fusione ed estrusione del PVA
Temperatura piano	60 °C	Stabilizzazione dell'adesione al piano
Layer height	0.30 mm	Definizione della risoluzione verticale della cassaforma
Quota del primo layer	0.53 mm	Impostazione iniziale della deposizione
Numero totale di layer	509	Estensione verticale complessiva della stampa
Altezza massima del pezzo	152.93 mm	Dimensione verticale della cassaforma
Wall line count	2	Definizione dello spessore perimetrale della stampa
Infill pattern	Gyroid	Struttura interna di riempimento
Infill density	10%	Percentuale di riempimento interno della cassaforma
Retraction speed	20 mm/s	Controllo della ritrazione nei movimenti non estrusivi
Retraction hop	Attivo	Riduzione del rischio di collisioni e trascinamenti
Brim line count	5	Incremento dell'adesione iniziale al piano
Tempo di stampa stimato	115924 s (circa 32 h 12 min)	Durata complessiva della fabbricazione

quella destinata a scomparire per liberare il manufatto finale. La preparazione della cassaforma si conclude con la verifica della sua continuità complessiva, della regolarità dell'apertura superiore di colata e dell'assenza di difetti evidenti che possano compromettere il contenimento del getto, andando oltre la semplice rimozione dal piano. È a questo punto che la stampabilità della cassaforma si converte in idoneità operativa alla colata.

In questo quadro, la cassaforma stampata in PVA rappresenta il vero punto di passaggio tra geometria digitale e materializzazione indiretta.



Figura 5.24

Cassaforma stampata in PVA prima della colata

5.5.4 Colata del materiale, maturazione e dissoluzione della cassaforma

Una volta completata la fabbricazione della cassaforma in PVA, la materializzazione del capitello avviene attraverso il riempimento del negativo con un **composito naturale a matrice minerale** a base di **calce naturale NHL 3.5**, geolegante minerale, sabbie silicee lavate, calcare dolomitico selezionato e fino di marmo bianco di Carrara, con **granulometria compresa tra 0 e 1,8 mm**. La scheda tecnica del materiale indica, come riferimento di impasto, **circa 5 l d'acqua per 25 kg di prodotto**, una **consistenza della malta fresca pari a circa 178 mm** e una **massa volumica della malta fresca di circa 1800 kg/m³**. Nel presente caso, tuttavia, la miscela è stata preparata riducendo l'idratazione di circa il **10%** rispetto al valore nominale, così da contenere il rischio che un eccesso d'acqua potesse attivare precocemente la dissoluzione del PVA durante la fase di colata. Questa scelta rende esplicita una condizione operativa specifica del regime indiretto: il materiale di riempimento deve risultare compatibile con la permanenza temporanea della cassaforma sacrificabile, oltre che colabile.

Figura 5.25

Fasi della colata del composito naturale a matrice minerale nella cassaforma in PVA



Dal punto di vista reologico, la miscela può essere descritta come **autolivellante**, poiché, una volta immessa nel negativo, tende a distribuirsi e a occupare le cavità della cassaforma sotto l'azione combinata della fluidità dell'impasto e della gravità. La preparazione è stata eseguita mediante **miscelazione meccanica con trapano e frusta miscelatrice**, mentre la colata è avvenuta **manualmente dall'alto, a più riprese**, così da favorire il progressivo riempimento delle zone più profonde e articolate del negativo. Questa modalità è coerente con la morfologia del capitello: in presenza di cavità, restringimenti e ramificazioni locali, una singola immissione rapida del materiale avrebbe aumentato il rischio di intrappolamento d'aria o di riempimento incompleto. La colata frazionata introduce invece un controllo empirico ma efficace del processo, consentendo di monitorare l'avanzamento del materiale all'interno del volume negativo.

Parametro	Valore / impostazione	Ruolo nel processo
Materiale di colata	Composito naturale a matrice minerale	Formazione del manufatto finale
Legante principale	Calce naturale NHL 3.5 e geolegante minerale	Costituzione della matrice del composito
Aggregati / cariche	Sabbie silicee lavate, calcare dolomitico selezionato, fino di marmo bianco di Carrara	Definizione della granulometria e della consistenza dell'impasto
Granulometria	0–1.8 mm	Controllo della finezza del materiale e della capacità di riempimento
Idratazione nominale da scheda	Circa 5 l / 25 kg	Valore di riferimento dell'impasto
Idratazione adottata	Circa 10% in meno del valore nominale	Riduzione del rischio di dissoluzione precoce del PVA
Consistenza della malta fresca	Circa 178 mm	Comportamento colabile / autolivellante del materiale fresco
Massa volumica della malta fresca	Circa 1800 kg/m³	Caratterizzazione del materiale in fase di getto
Modalità di miscelazione	Trapano con frusta miscelatrice	Preparazione omogenea dell'impasto
Modalità di colata	Manuale dall'alto, a più riprese	Riempimento progressivo del negativo
Compattazione	Sbattimento manuale	Riduzione delle bolle e miglioramento dell'assestamento
Criticità osservate	Formazione di bolle risolubile per battitura	Unica criticità significativa emersa in colata

Tabella 5.21: Composizione della miscela colata e parametri di getto

La compattazione è stata affidata a sistemi **vibranti manuali** della cassaforma, eseguiti per facilitare la risalita delle bolle e il migliore assestamento dell'impasto nelle porzioni più complesse del negativo. Le uniche criticità osservate in questa fase sono state infatti alcune **bolle d'aria**, che tendevano però a collassare o a risolversi proprio grazie alla battitura manuale. Il processo non ha mostrato rot-

ture della cassaforma, perdite di materiale, vuoti macroscopici o mancato riempimento delle parti più articolate, e ciò consente di leggere la fase di colata come sostanzialmente coerente con il dispositivo di mediazione definito nelle sezioni precedenti. Il capitello emerge quindi come risultato di una sequenza calibrata di compatibilità tra involucro idrosolubile, viscosità del materiale e modalità di riempimento del negativo.

Dopo il riempimento, il manufatto è stato lasciato maturare per un intervallo pari a circa 120 ore, prima di avviare la fase di dissoluzione della cassaforma. La rimozione del negativo avviene mediante immersione in acqua e progressiva dissoluzione del PVA per un tempo complessivo pari a circa 168 ore, in acqua a 40°C sostituita ogni 24 ore. È proprio in questo passaggio che il regime indiretto si distingue in modo definitivo dai casi precedenti: la complessità della forma viene resa producibile trasferendola a un supporto temporaneo la cui eliminazione è parte costitutiva del processo stesso. Una volta completata la dissoluzione, il capitello è stato sottoposto unicamente a una **leggera spazzolata**, senza ulteriori finiture rilevanti, così da mantenere leggibile il rapporto diretto tra qualità del negativo, comportamento del getto e superficie finale del manufatto.

La sequenza colata–maturazione–dissoluzione costituisce quindi il vero momento di compimento della mediazione produttiva introdotta dal PVA. La cassaforma negativa supera la funzione del semplice involucro stampato, operando come un dispositivo attraverso cui la complessità del capitello viene temporaneamente trattenuta, trasferita al materiale finale e infine rimossa senza imporre condizioni di disarmo incompatibili con la morfologia frattale.

Parametro	Valore / impostazione	Ruolo nel processo
Tempo di maturazione prima della dissoluzione	120 h	Stabilizzazione iniziale del manufatto colato
Avvio della dissoluzione	In acqua a 40°C	Eliminazione del negativo sacrificabile
Tempo totale di dissoluzione	168 h	Liberazione completa del capitello
Modalità di rimozione del negativo	Dissoluzione, non sformo meccanico	Superamento dei vincoli del disarmo tradizionale
Finitura finale	Leggera spazzolata	Pulizia superficiale del manufatto emerso

5.5.5 Verifica del prototipo finale e confronto con il digital mockup

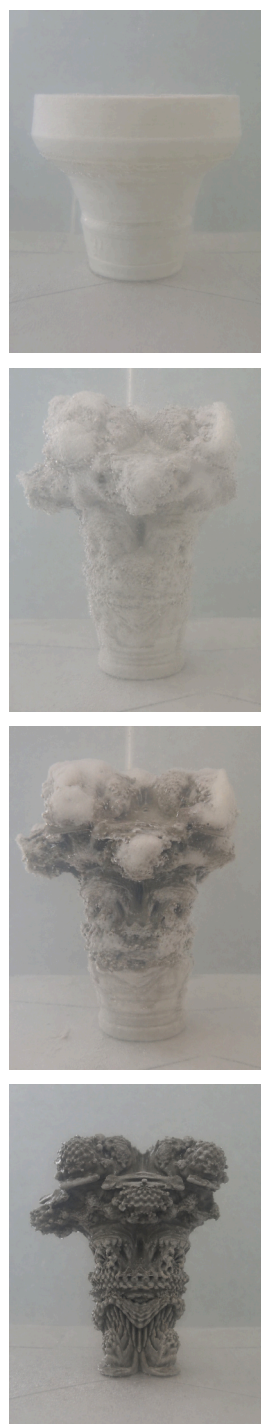
La fase conclusiva del caso studio indiretto consiste nella verifica del **capitello frattale** una volta completata la dissoluzione della cassaforma e liberato il manufatto finale. In questa sezione la producibilità viene letta come la capacità dell'intero processo di restituire un oggetto sufficientemente coerente con il **digital mockup** da cui

Tabella 5.18

Tempi e condizioni di dissoluzione del PVA

Figura 5.26

Processo di dissoluzione della cassaforma sacrificabile in PVA



la cassaforma era stata derivata. Il punto metodologicamente decisivo è che, nel regime indiretto, la validazione si sposta a valle del processo: l'attenzione si sposta dalla fabbricabilità diretta della forma alla **fedeltà morfologica ex post** del manufatto ottenuto attraverso la sequenza negativo in **PVA** → **colata** → **maturazione** → **dissoluzione**. Il prototipo viene quindi assunto come esito misurabile di una catena di mediazioni che può conservare, attenuare o deformare la complessità della forma frattale.

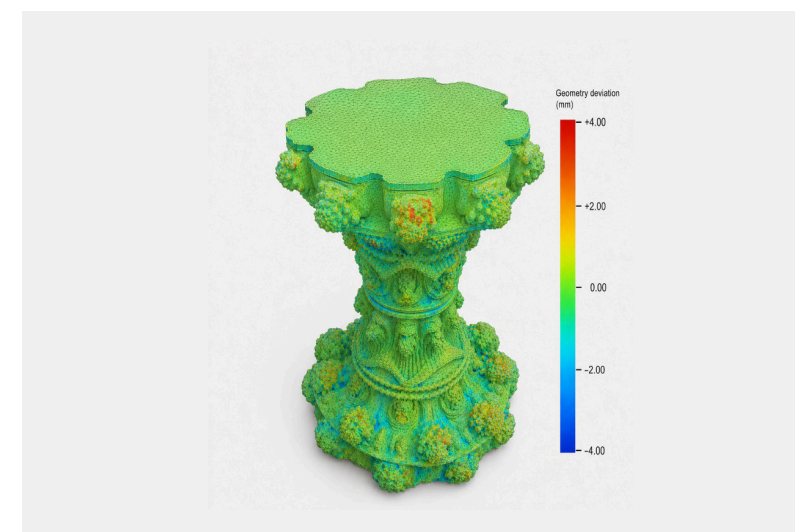
La verifica del manufatto può essere articolata su due livelli complementari. Il primo è di natura morfologica e qualitativa: presenza e continuità delle cavità principali, leggibilità delle perforazioni, tenuta delle ramificazioni locali, conservazione del rapporto tra massa centrale e articolazione periferica, assenza di collassi macroscopici o perdite strutturali nelle zone più complesse. Il secondo è di natura geometrica e comparativa e si fonda sull'acquisizione di una **scansione 3D** del capitello finito, successivamente allineata al mockup digitale di riferimento. Questa seconda verifica consente di trasformare l'osservazione del prototipo in un confronto misurabile tra forma prevista e forma ottenuta, localizzando gli scarti sia in termini quantitativi, sia in relazione alle specifiche condizioni del processo: dettaglio frattale, qualità del negativo, comportamento del materiale colato e dissoluzione della cassaforma.

Il confronto scan-to-model viene quindi impostato attraverso l'allineamento tra modello scansionato e modello teorico e il successivo calcolo della **geometry deviation** sull'intera superficie rilevabile del capitello. La mappa cromatica risultante permette di distinguere, da un lato, gli scarti distribuiti in modo diffuso ma contenuto, interpretabili come fisiologico effetto della risoluzione del negativo, della granulometria del composito e della perdita di dettaglio nelle zone più minute; dall'altro, eventuali scarti localizzati e più intensi, riconducibili a criticità specifiche del processo, quali accumuli d'aria, irregolarità del getto, dissoluzione incompleta o attenuazione della precisione nelle aree più sottosquadrate e perforate. Nel caso del capitello frattale, la geometry deviation deve essere letta come indicatore della capacità del regime indiretto di trasferire nel materiale finale i caratteri morfologici essenziali della configurazione frattale di partenza.

Nel quadro finale del caso studio, il confronto tra digital mockup e prototipo permette di formulare una valutazione più precisa del ruolo svolto dal regime indiretto all'interno del framework. Se gli scarti si mantengono entro un intervallo controllato **±3 mm** per la maggior parte della superficie e se le principali strutture morfologiche del capitello restano leggibili e continue, il processo può essere considerato validato come strategia efficace di trasferimento materiale di una forma non compatibile con i regimi diretti. Se invece le

Figura 5.27

Mappa cromatica della geometry deviation tra digital mockup e prototipo scansionato



deviazioni si concentrano sistematicamente nelle zone di massima complessità, il risultato non invalida il caso, ma ne chiarisce il limite operativo: non tutta la complessità generata viene restituita con la stessa fedeltà, e proprio questa differenza diventa un dato rilevante per la discussione finale del capitolo. In tal senso, il capitello frattale conclude la sequenza sperimentale del Capitolo 5, radicalizzandone il significato: mostra che la producibilità non è una proprietà assoluta della forma, bensì una relazione variabile tra complessità morfologica, regime produttivo e capacità del processo di conservare nel manufatto finale i caratteri essenziali del modello generativo.

Figura 5.28 a-b

*Capitello frattale finale dopo la
dissoluzione della cassaforma*



5.6 Analisi comparativa e sintesi della validazione

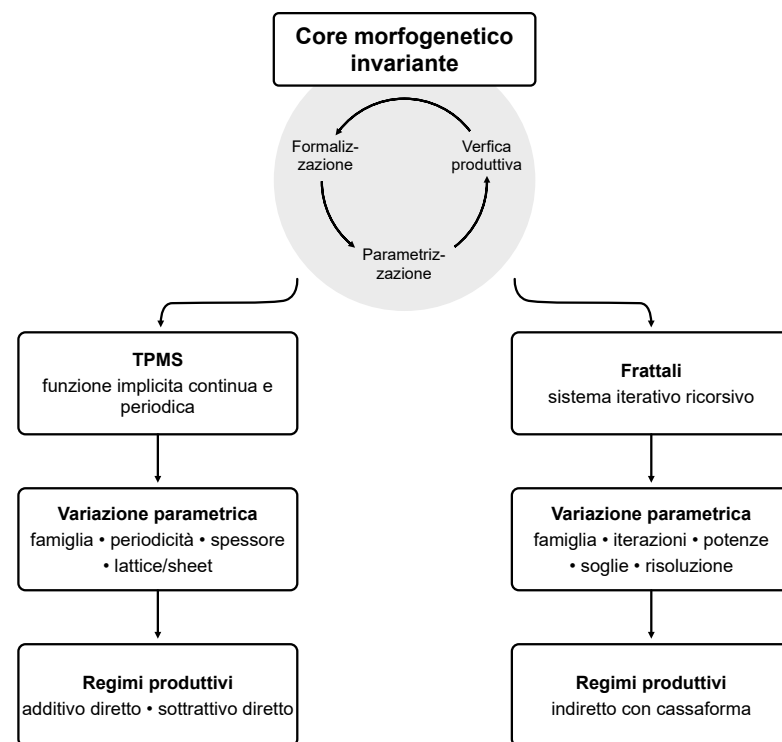
L'intera sequenza sperimentale del Capitolo 5 mostra che la validazione del framework non riguarda una singola famiglia formale, ma la tenuta del **core morfogenetico** attraverso domini generativi differenti.

Questa continuità metodologica è osservabile in tutti i passaggi chiave della validazione. Sia nel caso delle TPMS sia in quello dei frattali, il processo non si limita a produrre un'immagine o un oggetto isolato, ma costruisce uno **spazio di configurazioni** ottenuto attraverso il controllo parametrico della regola generativa. Il core agisce come dispositivo di traduzione tra principio morfogenetico e dominio delle varianti, rendendo la forma interrogabile non solo sul piano geometrico ma anche in rapporto alla sua futura producibilità.

L'invarianza del core non implica tuttavia uniformità dei risultati. Al contrario, proprio il confronto tra TPMS e frattali mostra che la stabilità della struttura metodologica è ciò che rende leggibile la **variazione dei domini morfogenetici**. Il fatto che entrambe le famiglie possano essere ricondotte allo stesso impianto di formalizzazione costituisce il primo esito forte della validazione comparativa: il framework non è vincolato a una specifica tipologia di forma, ma de-

Schema 5.13

Invarianza del core rispetto a famiglie morfogenetiche e regimi produttivi differenti

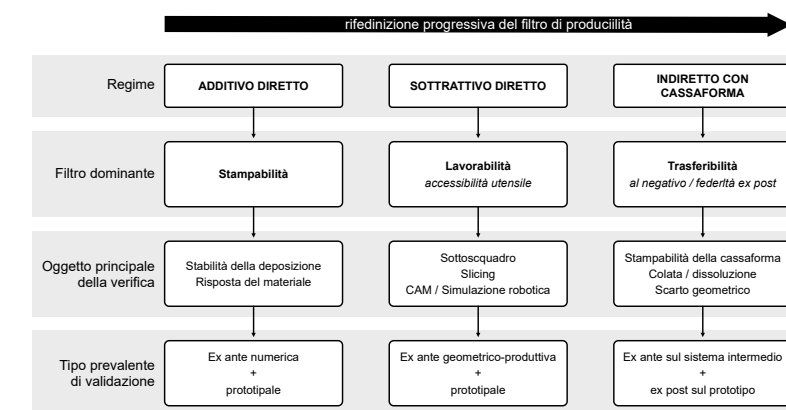


finisce una classe più generale di processi nei quali la morfologia può essere generata, parametrizzata e successivamente confrontata con un filtro produttivo. In questa prospettiva, il Capitolo 5 dimostra che la robustezza del framework risiede nella possibilità di mantenere stabile il **rapporto tra core, variazione e verifica** anche quando il dominio morfogenetico cambia radicalmente.

Il secondo risultato strutturale che emerge dall'analisi comparativa riguarda la natura della **producibilità**. I casi studio mostrano infatti che essa non costituisce una proprietà assoluta della forma, deducibile una volta per tutte dalla sola coerenza geometrica del modello, ma una condizione che prende forma ogni volta entro uno specifico **regime produttivo**. La validazione del capitolo 5 dimostra questo passaggio: il valore operativo di una morfologia non dipende solo dalla sua generabilità, ma dal criterio con cui viene verificata rispetto al regime entro cui si tenta di materializzarla.

Schema 5.14

Progressione dei filtri di producibilità dal regime additivo al regime indiretto



Su questa base, l'analisi comparativa consente di formulare un principio generale: ogni pa\ proprio questa mobilità del filtro che consente al framework di ampliare progressivamente il campo delle configurazioni trattabili, tema che verrà esplicitato nella sezione successiva come progressione della complessità morfogenetica affrontabile attraverso la co-evoluzione tra forma e processo.

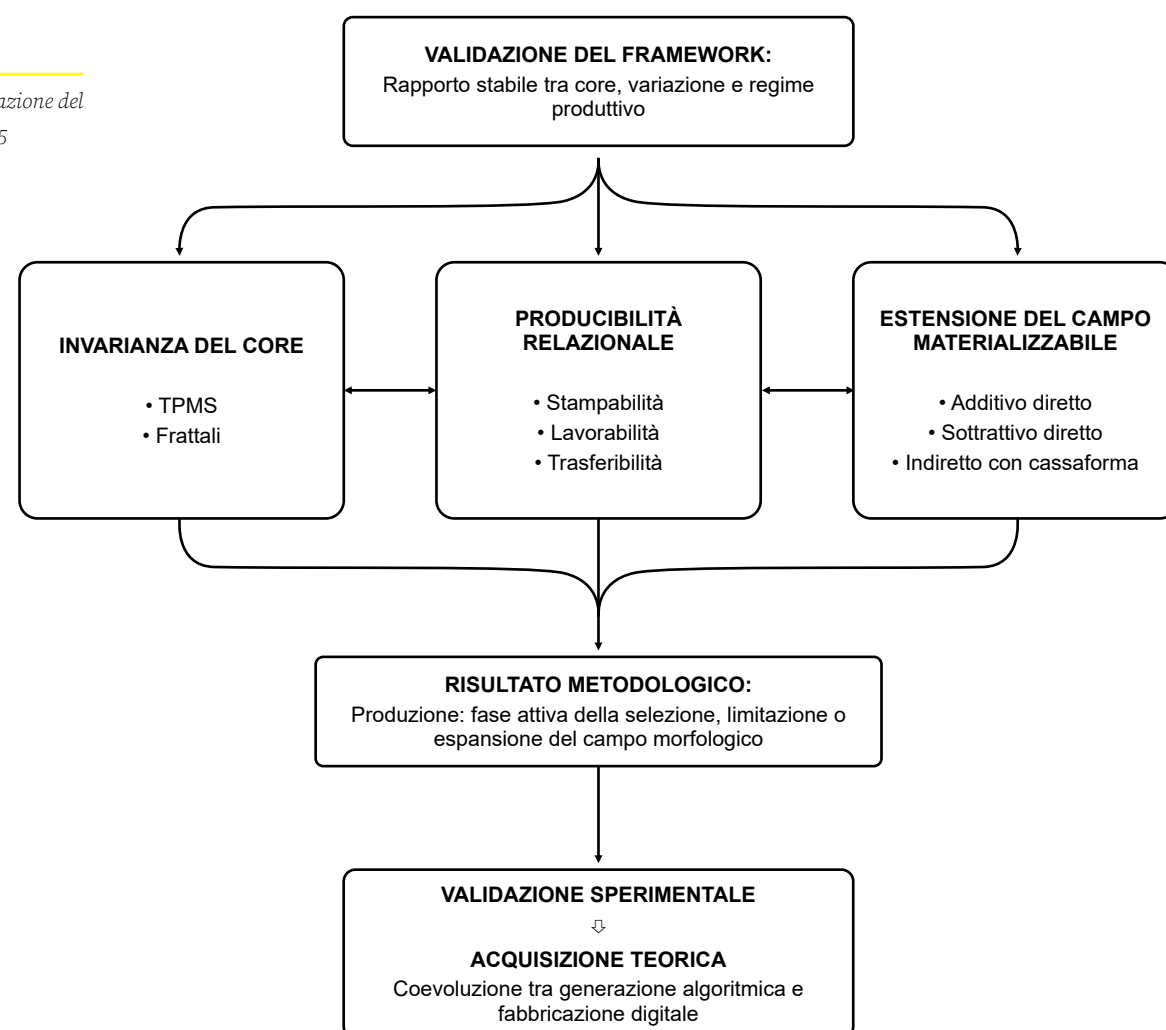
La sequenza sperimentale sviluppata nel Capitolo 5 consente di formulare una conclusione unitaria: il framework proposto, oltre a confermare la realizzabilità di alcuni prototipi isolati, risulta validato perché dimostra la stabilità del rapporto tra **core morfogenetico**, **variazione parametrica** e **regime produttivo** lungo casi studio progressivamente più complessi. Il risultato fondamentale consiste nella possibilità di mantenere invariata la struttura del modello mentre cambiano famiglia morfogenetica, scala, materiale e criterio di producibilità. In questo senso, il capitolo documenta la verifica sperimentale di una stessa logica metodologica operante entro

condizioni produttive differenti in una successione di applicazioni eterogenee.

Su questa base, il Capitolo 5 dimostra che la validazione sperimentale conferma l'ipotesi centrale della tesi: la complessità morfogenetica trattabile dipende solo in parte dalla potenza descrittiva del modello generativo, ma soprattutto dalla sua capacità di entrare in co-evoluzione con regimi produttivi differenti. La forma non precede semplicemente il processo, né il processo si limita a eseguire la forma; entrambi si ridefiniscono reciprocamente attraverso una dinamica iterativa in cui la producibilità agisce come criterio strutturale di selezione. La validazione riguarda la dimostrazione che il framework può articolare una relazione multi-regime tra generazione algoritmica e materializzazione fisica senza perdere coerenza interna.

Schema 5.15

Sintesi finale della validazione del framework nel Capitolo 5



5.7 Verifica incorporata e convergenza del processo di validazione

La sequenza sperimentale del Capitolo 5 va letta alla luce di un aspetto metodologico centrale: il ciclo **Algoritmo** → **Variazione** → **Producibilità** è costruito per incorporare la verifica all'interno del processo, anticipando una parte significativa del feedback prima della materializzazione finale. Per questa ragione, la validazione del framework non coincide con l'accumulo di numerosi prototipi intermedi, tentativi falliti o iterazioni fisiche ripetute. Il feedback produttivo agisce già nelle fasi di selezione delle varianti, controllo geometrico, simulazione, slicing, CAM, verifica di accessibilità e scelta del regime di fabbricazione. La produzione fisica diventa quindi il momento conclusivo di una catena di verifiche già attive nel modello.

In questo senso, il metodo opera come processo di **convergenza operativa**. L'uscita dal loop può avvenire dopo una o poche iterazioni significative, quando i filtri incorporati nel processo consentono di raggiungere una configurazione producibile. La ridotta quantità di prototipi scartati costituisce, in questo quadro, l'effetto di una verifica anticipata che riduce l'errore materiale e sposta la selezione critica nelle fasi computazionali e procedurali.

I tre casi studio mostrano livelli progressivi di questa convergenza. Nel caso dei moduli TPMS in fabbricazione additiva, la producibilità seleziona le varianti effettivamente trasferibili dal modello al prototipo. Nel caso del modulo TPMS in lavorazione sottrattiva robotica, il feedback riguarda l'organizzazione operativa attraverso cui la geometria diventa lavorabile. Per il capitello frattale, la convergenza avviene attraverso il trasferimento della producibilità dal positivo dell'oggetto al negativo temporaneo che ne consente la colata. Il cambio di regime diventa quindi una forma di feedback strutturale: la continuità del core morfogenetico viene mantenuta, mentre le condizioni di materializzazione vengono riorganizzate.

La validazione del framework risiede in questa progressione. La producibilità agisce prima come selezione delle varianti, poi come adattamento del processo, infine come possibile ridefinizione del regime produttivo. Il Capitolo 5 dimostra così che il loop metodologico non deve essere misurato soltanto dalla quantità di iterazioni visibili, ma dalla capacità di rendere esplicite le condizioni attraverso cui una morfologia generata diventa operativamente trattabile. La co-evoluzione tra forma e produzione emerge quindi come convergenza tra core algoritmico, variazione parametrica e sistema di fabbricazione.

C.6 Discussione

Capitolo Sesto

Dalla verifica dei casi
studio alla generalizzazione
del metodo

CAPITOLO 6 – DISCUSSIONE

Il Capitolo 6 interpreta criticamente i risultati della ricerca alla luce del modello teorico proposto, consolidando il contributo come esplicitazione di una relazione dinamica tra sistema generativo e sistema produttivo. La ricerca si configura come una costruzione metodologica unitaria in cui ogni caso studio agisce come dispositivo di verifica di un modello relazionale coerente. In tale modello, la formalizzazione implicita parametrica e il sistema produttivo sono poli di una dinamica reciproca che rende possibile la progressiva espansione della complessità morfogenetica trattabile. Il capitolo chiarisce inoltre i limiti del framework metodologico proposto, ne definisce l'ambito di applicabilità e ne posiziona il contributo nel panorama del design computazionale e della fabbricazione digitale, proponendo una lettura della produzione non come fase esecutiva finale, ma come componente attiva del sistema generativo.

Keywords

Discussione critica

*Generalizzazione
metodologica*

Trasferibilità

Limiti operativi

Scalabilità

Implicazioni disciplinari

6.1 Sintesi critica dei risultati alla luce del modello proposto

Letti isolatamente, i casi studio del Capitolo 5 potrebbero essere interpretati come una successione di verifiche tecniche eterogenee: moduli TPMS validati in regime additivo diretto, moduli TPMS verificati in regime sottrattivo diretto, e un capitello frattale reso materializzabile attraverso una mediazione indiretta tramite cassaforma sacrificabile. Una simile lettura, tuttavia, resterebbe descrittiva e perderebbe il punto teoricamente decisivo. Considerati alla luce del modello formalizzato nei Capitoli 3 e 4, questi casi dimostrano la tenuta di una stessa architettura metodologica attraverso condizioni morfologiche e produttive differenti. Il risultato da assumere criticamente non è quindi l'avvenuta realizzazione di singoli prototipi, bensì la dimostrazione che un core morfogenetico stabile può attraversare regimi produttivi diversi senza dissolversi in una casistica applicativa. In questo senso, il capitolo conferma una logica più vicina all'integrazione tra design e manufacturing che alla semplice traduzione lineare di una forma già definita, in coerenza con il quadro aperto da Kolarevic e Sass sul rapporto tra progettazione digitale e produzione integrata ^{4,24}.

Ciò che il Capitolo 5 ha effettivamente dimostrato può essere sintetizzato in tre punti. In primo luogo, è stata dimostrata l'invarianza procedurale del core rispetto a domini morfogenetici differenti: la continuità implicita e periodica delle TPMS e la logica iterativa ricorsiva dei frattali non hanno richiesto una rifondazione del dispositivo generativo, ma una sua diversa istanziazione parametrica. In secondo luogo, è stata dimostrata la natura non assoluta della producibilità: la stessa emerge come esito di filtri diversi — stampabilità, lavorabilità, trasferibilità a un negativo sacrificabile — che mutano con il regime produttivo. In terzo luogo, è stata dimostrata la possibilità di ampliare il campo delle configurazioni trattabili mediante la riorganizzazione del contesto produttivo entro cui la forma viene verificata. Questa triplice evidenza consente di leggere i casi studio come verifica progressiva di una struttura relazionale. Tale interpretazione trova un supporto teorico forte nelle posizioni che leggono la computazione come integrazione tra formazione, comportamento materiale e fabbricazione ^{5,15}.

Su questa base, il passaggio cruciale del paragrafo consiste nel distinguere con rigore tra dimostrazione e deduzione. È stato dimostrato che la producibilità dipende da una relazione variabile tra configurazione morfologica e regime produttivo. È stato dimostrato che il cambio di regime non equivale a un fallimento del sistema generativo, ma a una sua prosecuzione entro un nuovo filtro di compatibilità. Non è stato invece dimostrato — e sarebbe teoricamente

improprio sostenerlo già qui — che qualunque morfologia complessa possa essere resa producibile per semplice commutazione di regime. Una simile conclusione trasformerebbe un risultato metodologico circoscritto in una pretesa universalistica. Ciò che i casi consentono piuttosto di dedurre è qualcosa di più preciso: la produzione partecipa alla delimitazione del campo delle varianti che possono essere considerate operative intervenendo poi anche dopo la generazione della forma. In questo senso, la discussione si avvicina alla nozione di “informed tectonics”, nella quale design, making e fabrication compaiono come livelli reciprocamente informati del processo di materializzazione ²⁵.

Il significato teorico dei risultati emerge allora con maggiore nettezza. Il Capitolo 5 mostra che la produzione interviene come principio di selezione interna alla validazione stessa. Questo non implica ancora, in forma pienamente formalizzata, che la produzione debba essere definita come parte del sistema ma consente di stabilire la soglia teorica da cui quella formalizzazione diventa legittima. La validazione multi-regime trasforma infatti il rapporto tra forma e produzione da rapporto successivo a rapporto strutturale: il manufatto rende osservabile il modo in cui il processo ridefinisce la trattabilità della forma. In tale prospettiva, la materializzazione diviene il luogo in cui il sistema espleta i propri limiti, le proprie possibilità di adattamento e la propria coerenza operativa. È questo tipo di lettura che, nella letteratura su materiality, computational design e digital fabrication, viene associato a una concezione non lineare del progetto, in cui i modi della fabbricazione concorrono alla definizione della fisicità e del comportamento del sistema stesso ^{26,7}.

Da questa sintesi critica deriva infine la funzione strategica del paragrafo: mostrare perché il contributo della tesi sia teoricamente esigibile a partire dai risultati ottenuti. La lettura unitaria dei casi studio consente infatti di affermare che la validazione, oltre ad aver verificato un insieme di procedure, ha reso visibile una struttura relazionale stabile tra core morfogenetico, variazione parametrica e filtro produttivo. Il passaggio dal dato sperimentale alla sua interpretazione teorica consiste nel riconoscere che il valore dei risultati risiede nell'aver dimostrato, passando attraverso la fabbricazione di tre oggetti, che il campo della morfologia trattabile si costituisce entro la relazione tra generazione e produzione.

6.2 Formalizzazione del contributo: produzione come parte del sistema generativo

Il contributo principale della tesi può ora essere nominato con maggiore precisione: esso consiste nell'aver formalizzato un modello in

cui la produzione opera come variabile interna al sistema generativo, partecipando alla definizione delle condizioni entro cui una configurazione possa essere considerata non solo generabile, ma effettivamente trattabile. In questa formulazione, la produzione compare come componente che contribuisce a delimitare il campo operativo delle varianti. La differenza è decisiva: si afferma che la logica produttiva entri nella costituzione stessa dello spazio morfologico valido, oltre che la forma debba “tenere conto” della fabbricazione. Questo passaggio è coerente con quella linea di ricerca che, da Sass a Oxman e Menges, ha descritto il superamento di una relazione lineare tra descrizione geometrica e manifattura a favore di modelli integrati tra design, materiale e fabrication^{24,5,25}.

In questo quadro, il termine “sistema generativo” deve essere inteso in senso più rigoroso di quanto avvenga in molti approcci centrati sulla sola produzione di variazioni formali. Nel modello proposto dalla tesi, il sistema coincide con l’insieme delle relazioni tra **Core Morfogenetico > Parametrizzazione > Verifica di producibilità**. Il core resta la struttura invariabile che rende possibile l’istituzione di un dominio morfologico; tuttavia, tale dominio non coincide automaticamente con un dominio operativo. Esso diventa operativo solo quando la variazione parametrica viene attraversata da un filtro produttivo che ne seleziona le configurazioni compatibili con un determinato regime. È in questo passaggio che la produzione smette di essere interpretata come applicazione e viene riconosciuta come componente interna: essa concorre a definire quali forme, tra quelle generabili, possano assumere statuto di configurazioni producibili. Qui la nozione di “informed tectonics” formulata da Rivka Oxman è particolarmente utile, perché identifica processi progettuali computazionalmente informati dalla conoscenza esplicita del design, del making e della fabrication, cioè da informazioni che non restano esterne al progetto ma ne strutturano l’intelligenza operativa²⁵.

La portata teorica di questa riformulazione dipende dal fatto che la tesi non la enuncia soltanto sul piano programmatico, ma la fonda su una struttura dimostrativa precisa. I Capitoli 3 e 4 hanno formalizzato, rispettivamente, l’invarianza del core e il loop **Algoritmo → Variazione → Producibilità**; il Capitolo 5 ha mostrato che tale struttura regge quando cambiano famiglia morfogenetica, scala e regime produttivo. Solo grazie a questa concatenazione diventa legittimo sostenere che la produzione appartenga al sistema. In assenza di una validazione multi-regime, l’idea di integrazione tra progetto e fabbricazione resterebbe infatti un principio condivisibile ma generico, già ampiamente presente nella letteratura sul digital design-to-production continuum. Qui, invece, essa assume una formulazione più specifica: il regime produttivo oltre ad essere il mezzo con

cui una forma viene resa materiale, diviene il dispositivo che ridefinisce il perimetro del morfologicamente trattabile. In questo senso il contributo della tesi si distingue da un generico richiamo all’integrazione file-to-factory già discusso da Kolarevic, Sass e Gramazio-Kohler: il suo apporto mira a formalizzarne la logica relazionale entro un framework stabile, non soltanto a descrivere l’integrazione^{4,24,27}.

Ne deriva una ridefinizione altrettanto importante della nozione di forma. Se la produzione è interna al sistema, la forma non può più essere intesa come entità pienamente costituita in un momento anteriore alla sua verifica materiale. Essa deve essere definita come configurazione co-determinata, vale a dire come esito provvisorio ma formalmente consistente dell’interazione tra regola generativa, variazione parametrica e condizione di producibilità. Questa formulazione ricolloca l’autonomia del modello algoritmico entro un assetto relazionale più complesso. Ciò che viene riconosciuto come forma rilevante non è l’intero spazio astrattamente generabile, bensì la porzione di tale spazio che può essere stabilizzata entro una determinata ecologia di processo. In questa prospettiva, la tesi si avvicina alle posizioni che leggono materiale, struttura e fabbricazione come dati computazionalmente integrati nella definizione del progetto, ma ne offre una traduzione particolarmente chiara sul piano metodologico: la forma emerge come esito di una selezione interna, non come oggetto predefinito corretto a posteriori^{5,15,26}.

Su questa base, il contributo della tesi può essere espresso in una formula teoricamente più netta: la produzione costituisce una condizione di operatività del sistema generativo. La generazione conserva la funzione di apertura del campo morfologico, ma tale campo acquista consistenza disciplinare solo nel momento in cui viene attraversato da filtri produttivi che ne verificano, differenziano e riorganizzano le possibilità di attuazione. È proprio questa reciprocità asimmetrica — il core apre il dominio, il processo ne seleziona la trattabilità — che definisce la portata teorica del modello. Per questo motivo il contributo della tesi diviene l’esplicitazione e codifica di un sistema relazionale di co-determinazione tra generazione e produzione.

6.3 Co-evoluzione forma-materia mediata dal processo produttivo

A questo punto della discussione, la nozione di co-evoluzione può essere formulata con maggiore precisione. Nel quadro della tesi, essa rappresenta una dinamica in cui la forma algoritmica e la materia si ridefiniscono reciprocamente attraverso il processo produttivo che le mette in relazione. La co-evoluzione avviene, dunque,

entro una struttura mediata: il core morfogenetico apre un campo di possibilità, la variazione parametrica ne articola le configurazioni, e il regime produttivo rende alcune di esse operativamente accessibili, altre improprie, altre ancora trasferibili solo a condizione di cambiare il dispositivo di materializzazione. In questo senso, la co-evoluzione va intesa come trasformazione reciproca delle condizioni di trattabilità, non solo semplice adattamento della forma a una materia data o, inversamente, come emersione spontanea della materia al di fuori del progetto ^{5,25}.

Definita in questi termini, la co-evoluzione richiede di chiarire il ruolo della materia. La tesi assume la materia come insieme di comportamenti, resistenze, soglie e compatibilità che diventano effettivi solo quando un processo produttivo li rende operativi. È questo il punto decisivo. La materia agisce qui come termine che acquisisce efficacia nel momento in cui viene computazionalmente e tecnicamente mediato. Per questo motivo la co-evoluzione coincide con una relazione processuale in cui proprietà materiali e logiche generative si incontrano entro condizioni produttive determinate ^{25,26}.

È qui che il regime produttivo assume una funzione teoricamente centrale: esso rappresenta il mediatore che traduce la relazione tra algoritmo e materia in una serie di condizioni verificabili. Nel regime additivo diretto, questa mediazione si manifesta come stabilità della deposizione e continuità costruttiva; nel regime sottrattivo diretto, come accessibilità utensile e traducibilità della geometria in traiettorie operative; nel regime indiretto, come trasferibilità della complessità a una cassaforma sacrificabile e come fedeltà ex post del manufatto ottenuto. In tutti e tre i casi, ciò che cambia oltre al mezzo tecnico, è il modo in cui la materia diventa progettualmente rilevante. La stessa morfologia può risultare compatibile, incompatibile o trasferibile a seconda del tipo di mediazione che il processo rende possibile. È per questo che la co-evoluzione, nel senso proposto dalla tesi, va collocata in una triade **forma-processo-materia**, in cui il processo svolge la funzione di articolazione e verifica. Tale lettura è coerente con l'idea di "informed tectonics" come processo informato da design, making e fabrication, e con la nozione di "digital materiality" sviluppata da Gramazio e Kohler, secondo cui le conoscenze derivanti dalla produzione computer-aided vengono incorporate direttamente nel processo architettonico ^{25,27}.

Da questa impostazione deriva una ridefinizione della morfologia stessa. Se la co-evoluzione è mediata dal processo, la forma finale va intesa come esito processuale: una configurazione che si stabilizza attraverso una catena di verifiche, adattamenti, trasferimenti e riorganizzazioni. Nel lessico della tesi, ciò significa che la morfologia coincide con la configurazione che riesce a mantenere continuità tra regola generativa, variazione parametrica e condizioni di mate-

rializzazione. In tale prospettiva, il processo partecipa alla sua definizione effettiva: la co-evoluzione va quindi intesa come processo di co-determinazione progressiva, in cui né la forma precede integralmente la materia, né la materia determina da sola la forma, ma entrambe si rendono reciprocamente intelligibili entro un regime operativo condiviso ^{5,15}.

6.4 Differenza rispetto a modelli puramente generativi o puramente ottimizzativi

Per chiarire con precisione il contributo della tesi, è necessario collocare il framework proposto rispetto a due grandi famiglie di modelli già consolidate nel campo del design computazionale: da un lato, i modelli puramente generativi, orientati all'espansione dello spazio formale attraverso regole, grammatiche, algoritmi o procedure parametriche; dall'altro, i modelli puramente ottimizzativi o performance-based, orientati alla selezione delle configurazioni in funzione di criteri misurabili di prestazione. La distinzione va qui intesa come chiarificazione teorica di due polarità che la letteratura ha ampiamente tematizzato. Rivka Oxman, nel costruire una tassonomia dei modelli digitali, distingue esplicitamente tra **generative models** e **performance models**, mostrando come il campo contemporaneo oscilla tra produzione di varietà formale e valutazione prestazionale. Più recentemente, Caetano, Santos e Leitão hanno ribadito la necessità di distinguere con rigore tra design parametrico, generativo e algoritmico, proprio per evitare sovrapposizioni terminologiche che renderebbero opaca l'identità metodologica dei diversi approcci ^{1,3}.

Rispetto al primo polo, il framework della tesi si distingue dai modelli puramente generativi perché non identifica il valore del sistema con la sua capacità di produrre differenza formale. Nei modelli generativi in senso stretto, la forza del metodo risiede spesso nell'apertura del dominio delle varianti: l'algoritmo o la grammatica valgono in quanto permettono di articolare uno spazio di possibilità, di esplorare famiglie morfologiche e di moltiplicare configurazioni potenziali. Questa dimensione è certamente presente anche nella tesi, poiché il core morfogenetico costruisce effettivamente uno spazio parametrico di varianti. Tuttavia, qui tale spazio non esaurisce il significato del sistema. Le configurazioni generate non vengono assunte come formalmente rilevanti per il solo fatto di essere computazionalmente producibili come varianti, ma sono sottoposte a un filtro di producibilità che ne ridefinisce lo statuto. In altri termini, la generazione non coincide con l'istituzione autonoma della forma, perché il dominio morfologico aperto dal core acquista

valore operativo solo nel momento in cui viene attraversato da condizioni materiali e produttive. È questo passaggio che separa il framework da un generativismo autoreferenziale o esclusivamente esplorativo: la forma non vale qui come semplice risultato di una regola, ma come configurazione che entra in una relazione verificabile con il processo di materializzazione ^{1,25}.

Ma il framework della tesi non coincide nemmeno con i modelli puramente ottimizzativi. Nel paradigma performance-based, la generazione è spesso integrata con dispositivi di analisi, simulazione e valutazione finalizzati a selezionare soluzioni più efficienti rispetto a una o più metriche. Rivka Oxman ha descritto questo paradigma come uno sviluppo decisivo del digital design, mentre Shea, Aish e Gourtovaia hanno mostrato come strumenti performance-driven possano integrare generazione e valutazione entro cicli computazionali orientati al miglioramento delle prestazioni. In questi approcci, tuttavia, il problema tende a essere formulato come ricerca della soluzione migliore entro un quadro di obiettivi esplicitamente definibili. Il modello della tesi si colloca altrove. Qui la producibilità cambia con il regime produttivo, ridefinisce i criteri stessi della verifica e non si lascia esaurire in una logica di ottimizzazione lineare. La stampabilità del regime additivo, la lavorabilità del regime sottrattivo e la trasferibilità al negativo nel regime indiretto sono condizioni eterogenee che ridefiniscono di volta in volta il significato stesso del “problema” produttivo. Per questo motivo, il framework non può essere letto come un sistema di performance optimization in senso stretto: esso non cerca semplicemente la soluzione migliore, ma riorganizza il quadro delle compatibilità entro cui una soluzione può diventare producibile ^{28,29}.

La differenza più rilevante emerge dunque proprio nel punto in cui il framework della tesi evita di coincidere sia con il form finding astratto sia con il problem solving prestazionale. Il modello lavora, invece, su una relazione più instabile e più densa teoricamente: il framework non cerca né la libertà assoluta della generazione né la chiusura teleologica dell'ottimizzazione, ma una coerenza relazionale tra ciò che la forma può diventare e ciò che il processo rende effettivamente stabilizzabile. È qui che la nozione di “informed tectonics” diventa particolarmente utile, perché consente di pensare la forma non come pura invenzione né come puro output di prestazioni, ma come esito di una mediazione tra design, materialità e fabrication ²⁵.

Su questa base, l'originalità del framework proposto dalla tesi può essere definita con maggiore nettezza. La sua specificità sta nell'aver mostrato che entrambe le polarità diventano teoricamente insufficienti quando la produzione viene riconosciuta come componente interna del sistema. Un modello puramente generativo tende,

infatti, a non spiegare in modo adeguato perché alcune configurazioni, pur formalmente legittime, cessino di essere operative entro determinati regimi materiali; un modello puramente ottimizzativo tende invece a ricondurre il progetto a un problema di selezione prestazionale, senza cogliere pienamente il fatto che il quadro delle compatibilità può cambiare quando cambia il dispositivo produttivo. Il framework della tesi assume invece questa mobilità come parte costitutiva del sistema: non cerca semplicemente forme possibili, né semplicemente forme migliori, ma forme la cui trattabilità emerga entro una relazione multi-regime tra generazione, materiale e produzione.

6.5 Limiti e condizioni di validità del framework

La forza teorica del framework proposto dipende dalla possibilità di circoscriverne con precisione il campo di validità. Per questa ragione, i limiti della ricerca divergono dall'essere presentati come clausole difensive poste a margine del contributo, bensì come parte integrante della sua definizione. Il modello risulta infatti convincente proprio nella misura in cui chiarisce il tipo di relazione che è in grado di formalizzare: quella tra un core morfogenetico esplicito, uno spazio parametrico controllabile e un sistema produttivo traducibile in filtri di producibilità verificabili. Ciò implica che la validità del framework non possa essere estesa in modo automatico a qualsiasi pratica di computational design, né a qualsiasi relazione tra forma e produzione. Una simile cautela è coerente con la letteratura che insiste sulla necessità di distinguere accuratamente tra approcci parametrici, generativi e algoritmici, e con i modelli material-based che definiscono l'integrazione come configurazione specifica del progetto, e non come tratto genericamente attribuibile a ogni processo digitale ^{3,25}.

Un primo ordine di limiti è di natura empirica. La validazione sviluppata nella tesi riguarda un corpus sperimentale definito, articolato su due famiglie morfogenetiche — TPMS e frattali — e su tre regimi produttivi — additivo diretto, sottrattivo diretto e indiretto tramite cassaforma sacrificabile. Questo corpus è sufficiente a dimostrare la tenuta del modello entro una gamma significativa di casi, ma non autorizza a dedurre la validità immediata per qualunque altra famiglia geometrica, materiale o tecnologia di fabbricazione. In particolare, la tesi non dimostra che ogni sistema generativo complesso possa essere trattato attraverso la stessa logica, né che ogni regime produttivo possa essere ricondotto senza residui ai tre filtri discussi. Essa mostra, più precisamente, che entro il perimetro delle configurazioni indagate il framework mantiene coerenza e capa-

cità di adattamento. Il limite empirico non indebolisce il contributo; ne definisce piuttosto la scala effettiva di dimostrazione.

Un secondo ordine di limiti è metodologico e riguarda le condizioni stesse di applicabilità del modello. Il framework presuppone anzitutto che il sistema generativo sia formalizzabile in modo esplicito. Non è sufficiente che una forma sia descrivibile intuitivamente o manipolabile per via visiva: occorre che essa possa essere organizzata come struttura algoritmica stabile, parametrizzabile e interrogabile rispetto a uno spazio di varianti. Inoltre, il modello richiede che il regime produttivo possa essere tradotto in criteri di verifica sufficientemente chiari da operare come filtro di producibilità. Quando tali condizioni non sussistono — ad esempio il processo dipende da variabili non controllabili, o perché il sistema generativo non ammette una parametrizzazione coerente — il framework perde gran parte della propria efficacia. In questo senso, la sua robustezza non coincide con la capacità di adattarsi a tutto, ma con la possibilità di operare con rigore là dove esistono condizioni di formalizzazione e verifica comparabili ⁵.

Un terzo ordine di limiti è teorico. Il framework affronta un problema più circoscritto: la formalizzazione della relazione tra generazione algoritmica e materializzazione produttiva entro una dinamica di co-determinazione multi-regime. Restano quindi fuori dal suo perimetro, almeno nella formulazione attuale, questioni che pure sono disciplinarmente rilevanti: il valore estetico e simbolico delle forme generate, le implicazioni culturali della scelta dei processi produttivi, la valutazione ambientale e di ciclo di vita, le dinamiche economiche della fabbricazione, e più in generale gli aspetti sociali e politici della produzione digitale. Il framework non è stato costruito per risolvere questi problemi, e non sarebbe corretto attribuirgli una portata che ecceda il proprio oggetto. La sua ambizione è più precisa: mostrare come la produzione possa essere assunta come componente interna del sistema generativo; non esaurire tutte le dimensioni teoriche del progetto computazionale.

Proprio per questo, la trasferibilità del modello deve essere intesa come replicabilità di condizioni strutturali. Il framework è trasferibile quando ricorrono almeno tre condizioni: un core stabile, spazio parametrico controllabile e un processo produttivo traducibile in criteri di verifica operativi. Dove queste tre condizioni si danno con chiarezza, il modello può essere esteso, adattato e riarticolato anche oltre i casi trattati nella tesi. Dove invece una di esse viene meno, la trasferibilità si riduce e richiede una riformulazione più profonda del metodo. La nozione stessa di robustezza va dunque intesa in senso condizionato: il framework è robusto perché mantiene coerenza interna quando viene applicato entro problemi che condividono la stessa struttura relazionale. In questo senso, esso si collo-

ca accanto alle ricerche che insistono sull'integrazione tra computazione e materializzazione, ma se ne distingue per l'enfasi sulla delimitazione esplicita delle condizioni di operatività ^{24,5}.

6.6 Implicazioni disciplinari per il design computazionale

Le acquisizioni emerse nei paragrafi precedenti consentono ora di chiarire la portata disciplinare del modello proposto: il punto è che esso suggerisce una ridefinizione più generale del design computazionale come campo in cui generazione, parametrizzazione, materiale e fabbricazione non possono più essere pensati come domini separati. La rilevanza della tesi dipende dal fatto che essa contribuisca a spostare il baricentro disciplinare: dal progetto computazionale inteso come produzione di forme al progetto computazionale inteso come costruzione di relazioni operative tra forma e processo. Questo spostamento si inserisce in una traiettoria già riconoscibile nella letteratura che ha legato la trasformazione digitale dell'architettura e del design alla crescente integrazione tra progettazione e manifattura, ma qui viene formalizzato in modo più stringente entro una logica relazionale esplicita.

Da questo punto di vista, la tesi propone implicitamente un ripensamento del design computazionale oltre la sola generazione. Per una parte significativa della sua storia recente, il campo ha tratto la propria forza dalla capacità di produrre complessità, variazione e differenziazione formale. Tale contributo resta fondamentale e non viene negato. Tuttavia, il modello discusso in questa tesi mostra che la generazione, da sola, non è sufficiente a esaurire la portata disciplinare del progetto computazionale. Uno spazio morfologico, per quanto ricco, non acquisisce automaticamente consistenza operativa solo perché è algoritmicamente descrivibile. Diventa disciplinarmente rilevante quando entra in una relazione verificabile con i processi che ne consentono la stabilizzazione materiale. In questo senso, il design computazionale oltre che apparire come tecnica di invenzione della forma, diviene anche pratica capace di organizzare condizioni di traducibilità tra regola generativa e materializzazione. È qui che la tesi dialoga con la nozione di **higher integration** formulata da Menges e con la nozione di **informed tectonics** proposta da Oxman, ma ne declina le conseguenze entro un framework metodologico definito.

La seconda implicazione disciplinare riguarda il rapporto tra forma, processo e produzione. Se la produzione è assunta come componente interna del sistema generativo, allora il progetto non può più essere descritto come successione lineare tra concezione formale ed esecuzione materiale. Il processo produttivo contribuisce a

definirne il perimetro operativo, i limiti e le possibilità di trasformazione. Ne consegue che la forma stessa deve essere intesa meno come oggetto predeterminato e più come configurazione che si stabilizza all'interno di una dinamica di verifica. Questa ridefinizione ha un rilievo disciplinare notevole perché sposta il design computazionale da una logica prevalentemente rappresentativa o esplorativa a una logica più propriamente processuale. La forma smette di coincidere con il solo output del sistema generativo e viene riletta come esito di una mediazione tra core, parametri, materiale e fabbricazione. In questo senso, il modello proposto si colloca in prossimità di ciò che Gramazio e Kohler definiscono **digital materiality** e di ciò che Ahlquist e Menges tematizzano come **centralità dei material systems emergenti**, ma vi aggiunge una più esplicita formalizzazione del ruolo dei filtri di producibilità.

Una terza implicazione riguarda la nozione stessa di metodo nel design computazionale contemporaneo. Il framework della tesi suggerisce infatti che il metodo debba essere inteso come struttura teorica capace di esplicitare i rapporti tra ciò che genera e ciò che rende operativa la generazione. In questo quadro, la tesi contribuisce a rafforzare una concezione del computational design come disciplina riflessiva, impegnata nella costruzione di modelli in cui l'integrazione tra forma e produzione sia pensabile, verificabile e discutibile. Il contributo disciplinare consiste quindi nel fornire una grammatica concettuale per interpretare in modo più rigoroso il rapporto tra morfogenesi algoritmica e fabbricazione digitale. Tale aspetto è particolarmente rilevante in un contesto in cui il lessico dell'integrazione tra design e making è ormai diffuso, ma spesso rimane formulato in termini generici o programmatici. Qui, al contrario, esso viene ricondotto a un sistema di relazioni esplicite tra invarianti e variabili, tra apertura morfologica e selezione produttiva.

6.7 Originalità metodologica e condizioni di generalizzazione

L'originalità della ricerca può essere precisata distinguendo tra innovazione tecnica e contributo metodologico. La tesi utilizza strumenti, riferimenti e processi già appartenenti al campo del design computazionale e della fabbricazione digitale: modellazione implicita, variazione parametrica, simulazione, verifica di producibilità, prototipazione additiva, lavorazione sottrattiva robotica e fabbricazione indiretta tramite cassaforma. Il contributo specifico risiede nella loro ricomposizione entro una struttura unitaria, capace di mettere in relazione core algoritmico, spazio delle varianti, filtro produttivo e regime di materializzazione. In questo senso, il valore del lavoro non coincide con l'introduzione di una singola tecnica

inedita, ma con la costruzione di una grammatica operativa attraverso cui leggere il passaggio dalla morfologia generabile alla morfologia producibile.

Questa posizione colloca la tesi in continuità con Material Computation, Morphogenetic Design e design-through-making, assumendo però un punto di osservazione specifico. Mentre tali linee di ricerca hanno mostrato il ruolo attivo della materia, del comportamento fisico e del processo costruttivo nella configurazione della forma, il presente lavoro concentra l'attenzione sulla relazione tra invarianza morfogenetica e variabilità produttiva. Il core algoritmico rappresenta l'elemento di continuità; i parametri, i filtri di producibilità e i regimi di fabbricazione costituiscono invece le condizioni attraverso cui tale continuità viene verificata, adattata e resa materialmente operativa. La produzione assume così il ruolo di soglia metodologica: seleziona le configurazioni trasferibili, evidenzia i limiti del sistema, orienta eventuali ricalibramenti e può determinare il passaggio verso strategie produttive alternative.

La generalizzazione del framework va quindi intesa come trasferibilità controllata. La tesi ha verificato il modello su due famiglie morfogenetiche distinte: le TPMS, caratterizzate da continuità e periodicità spaziale, e le strutture frattali, fondate su logiche iterative e ricorsive. Tale scelta dimostra la tenuta del core entro un campo significativo di sistemi impliciti parametrici, articolato tra continuità matematica e complessità ricorsiva. L'estensione ad altri paradigmi morfogenetici richiede ulteriori verifiche, soprattutto nei casi in cui la generazione dipenda da campi locali non uniformi, da comportamenti materiali attivi o da processi adattivi più strettamente accoppiati alla simulazione fisica.

I limiti del modello definiscono quindi il suo perimetro di validità. Il framework risulta applicabile quando il sistema morfogenetico può essere esplicitato, parametrizzato e sottoposto a criteri produttivi riconoscibili. La sua efficacia dipende dalla possibilità di distinguere tra struttura generativa, variabili di controllo, soglie di producibilità e regime di fabbricazione. Entro queste condizioni, la tesi propone un modello capace di rendere discutibile e verificabile la co-evoluzione tra forma e produzione. La generalizzazione futura del metodo dovrà misurarne la tenuta rispetto a famiglie morfogenetiche ulteriori, materiali differenti e processi produttivi più complessi, mantenendo chiara la distinzione tra ciò che è stato dimostrato e ciò che viene aperto come campo di ricerca successivo.

C.7 Conclusioni

Capitolo Settimo

Esiti della ricerca,
contributi e sviluppi
futuri

CAPITOLO 7 – CONCLUSIONI

Il Capitolo 7 ricomponе l'intero percorso della ricerca evidenziando come la formalizzazione del core implicito parametrico abbia consentito la dimostrazione strutturale della co-evoluzione tra sistema generativo e sistema produttivo attraverso regimi multipli. Il contributo della tesi risiede nella definizione di una classe di sistemi morfogenetici impliciti parametrici generalizzabile oltre le famiglie investigate, capace di operare come struttura formale invariabile in contesti materiali e tecnologici differenti. Il capitolo astrae tale risultato delineandone implicazioni teoriche e potenziali sviluppi futuri nel campo del design computazionale e della fabbricazione digitale.

Keywords

*Sintesi conclusiva
Percorso dimostrativo
Contributo conoscitivo
Sviluppi futuri
Aperture di ricerca
Continuità metodologica*

7.1 Ricomposizione del percorso dimostrativo

Guardata nella sua interezza, la ricerca si presenta come una costruzione dimostrativa progressiva, nella quale ogni passaggio acquista senso solo in rapporto a quello precedente e a quello successivo. Il punto di partenza è costituito dall'individuazione di una discontinuità strutturale tra sistema generativo e sistema produttivo nel campo del design computazionale e della fabbricazione digitale: da un lato, la crescente sofisticazione dei modelli morfogenetici; dall'altro, la persistente difficoltà di formalizzare il loro rapporto con le condizioni materiali e tecnologiche della produzione. La tesi prende forma a partire da questa frattura, non per colmarla in modo descrittivo o applicativo, ma per costruire un modello capace di renderla teoricamente trattabile.

Su questa base, il percorso si è sviluppato in una sequenza logicamente necessaria. Il primo passaggio è consistito nell'esplicitazione del problema in termini operativi: non era sufficiente assumere la complessità morfogenetica come dato, né la produzione come semplice vincolo esterno; occorreva invece individuare una struttura generativa sufficientemente stabile da poter essere interrogata, parametrizzata e verificata. È a questo livello che il core morfogenetico implicito parametrico ha assunto una funzione decisiva. La sua definizione ha costituito il presupposto teorico della sua dimostrabilità: solo una volta codificata la struttura generativa come sistema coerente è stato possibile sottrarre il discorso sulla forma alla contingenza dei singoli casi e aprire la possibilità di una verifica comparabile.

Il secondo passaggio è stato la costruzione del framework metodologico, cioè la trasformazione della formalizzazione in un sistema relazionale esplicito. Attraverso il loop **Algoritmo** → **Variazione** → **Producibilità**, la ricerca ha mostrato che il problema non poteva essere risolto né sul piano della sola generazione né su quello della sola esecuzione. La variazione parametrica ha introdotto il dominio delle configurazioni possibili; la producibilità ha introdotto il filtro attraverso cui tali configurazioni diventano selezionabili, riformulabili o, se necessario, trasferibili a un diverso regime produttivo. In questo modo, la tesi ha costruito una struttura capace di rendere osservabile la relazione tra core morfogenetico e sistema produttivo.

La validazione sperimentale del Capitolo 5 ha rappresentato il momento in cui questa struttura è stata sottoposta a prova: la funzione dei casi studio è stata quella di verificare se il modello mantenesse coerenza al variare delle famiglie morfogenetiche, delle scale e dei regimi di fabbricazione. È in questo punto che il percorso dimostrativo si è fatto più stringente: la ricerca oltre a mostrare che un algo-

ritmo poteva produrre forme differenti, ha verificato che la relazione tra core, variazione e filtro produttivo restava leggibile anche quando cambiavano in modo sostanziale la natura della morfologia e il contesto della materializzazione. La validazione ha quindi svolto una funzione strutturale, non illustrativa: ha trasformato il framework da ipotesi metodologica a modello verificato entro un campo sperimentale definito.

Infine, la tesi ha compiuto un ulteriore passaggio, decisivo sul piano teorico: ha mostrato che i risultati della validazione andavano interpretati come base per formalizzare il contributo della tesi. In quella sede, la produzione è stata ridefinita come componente interna del sistema generativo, la co-evoluzione forma-materia è stata chiarita come dinamica mediata dal processo produttivo, e il modello è stato distinto sia dagli approcci puramente generativi sia da quelli puramente ottimizzativi. In tal modo, la ricerca è passata dalla verifica di una struttura al chiarimento del suo significato disciplinare.

7.2 Astrazione del core morfogenetico come classe di sistemi impliciti parametrici

Il punto teoricamente più rilevante che la ricerca consente di trattare in forma conclusiva riguarda la natura del core morfogenetico formalizzato nei capitoli precedenti. Ciò che la tesi consente di affermare, in termini più precisi, è che il core può essere inteso come una classe di sistemi morfogenetici impliciti parametrici: non un repertorio di forme, non una singola famiglia geometrica, ma una struttura formale generale capace di mantenere continuità logica attraverso istanze morfologiche differenti.

Il passaggio dal caso particolare alla classe di sistemi è reso possibile dal fatto che l'invarianza osservata nel corso della ricerca non riguarda gli esiti formali, bensì il principio operativo che li rende trattabili. Le TPMS e i frattali, pur divergendo radicalmente per continuità, periodicità, iteratività, gerarchia del dettaglio e comportamento morfologico, sono stati ricondotti allo stesso impianto senza che il core perdesse identità. Questa continuità deriva dal fatto che entrambe le famiglie possono essere organizzate entro una medesima logica: una regola morfogenetica formalizzabile, una traduzione in un dominio discretamente interrogabile e un sistema parametrico capace di aprire uno spazio di varianti controllabili. In questo senso, l'astrazione del core non elimina le differenze tra le forme; al contrario, le rende teoricamente leggibili come variazioni di istanza entro una struttura più generale.

Definire il core come classe di sistemi impliciti parametrici significa allora precisarne i caratteri costitutivi. “Impliciti”, perché la morfologia non è assunta come semplice superficie già data, ma come esito di una regola che definisce un campo e rende la forma emergente da una condizione di soglia, di livello o di iterazione formalizzabile. “Parametrici”, perché tale regola non genera un solo oggetto, ma un dominio di configurazioni variabili, la cui modificazione resta interna al sistema e non si riduce a manipolazione esterna della geometria. “Sistemi”, infine, perché il nucleo della ricerca non risiede nel valore isolato della funzione o dell’algoritmo, ma nella relazione coerente tra formalizzazione, variazione e verificabilità.

7.3 Dimostrazione della co-evoluzione multi-regime

Uno dei risultati più rilevanti che la tesi consente di trattenere in forma conclusiva riguarda il significato della co-evoluzione tra sistema generativo e sistema produttivo. A questo livello, il punto decisivo è che tale relazione è stata costruita e verificata progressivamente attraverso una dimostrazione che ha attraversato regimi di fabbricazione differenti. Questo passaggio conferisce alla nozione di co-evoluzione una consistenza teorica più forte: quella di esito osservabile della tenuta del modello entro condizioni produttive diversificate.

La pluralità dei regimi rappresenta la condizione di validità comparativa del percorso sperimentale. Se la ricerca si fosse limitata a un solo regime produttivo, il rapporto tra sistema generativo e sistema produttivo avrebbe potuto essere letto come compatibilità locale, forse significativa ma ancora insufficiente a fondare una conclusione più generale. La presenza di regimi differenti ha invece reso possibile una prova più stringente: la stessa struttura formale è stata sottoposta a filtri di producibilità diversi, ciascuno dei quali ha ridefinito le condizioni di trattabilità della morfologia senza annullare l’identità del core. La co-evoluzione è stata così resa visibile nella capacità del modello di mantenere continuità logica attraverso differenze produttive sostanziali.

Questo punto richiede una distinzione essenziale. Nei singoli casi studio, il modello ha certamente richiesto adattamenti locali. Considerati isolatamente, questi adattamenti potrebbero apparire come risposte contingenti a problemi diversi. Ma è proprio la loro riconducibilità a una medesima struttura che ne modifica il significato. Essi sono il modo concreto in cui il sistema mostra la propria natura relazionale. La co-evoluzione, in altri termini, consiste nella possibilità di attraversare le differenze tra regimi produttivi diversi senza perdere l’unità del modello.

Su questa base, il contributo della tesi può essere precisato in un punto ulteriore. Ciò che la dimostrazione multi-regime rende possibile affermare non è soltanto che il framework funziona in contesti produttivi diversi, ma che la variabilità dei regimi costituisce il luogo stesso in cui la co-evoluzione diventa dimostrabile. Se il core fosse mutato radicalmente a ogni passaggio di regime, avremmo avuto una successione di soluzioni indipendenti; se i regimi non avessero modificato in nulla il campo delle configurazioni trattabili, la produzione sarebbe rimasta esterna al sistema. Il fatto che si dia simultaneamente continuità del modello e ridefinizione delle condizioni di producibilità è invece il segno di una relazione strutturale. È in questo senso che la co-evoluzione può essere trattenuta come esito dimostrato della ricerca: non come formula evocativa, ma come descrizione rigorosa del modo in cui il sistema generativo e il sistema produttivo si mettono reciprocamente alla prova entro una logica multi-regime.

7.4 Generalizzazione ed estensioni future del modello morfogenetico implicito parametrico

Il punto conclusivo che la tesi rende ora affrontabile riguarda la generalizzazione del modello proposto. Ciò che la ricerca consente di trasferire oltre il proprio corpus sperimentale è un sistema relazionale in cui un core morfogenetico implicito parametrico può essere formalizzato, articolato in uno spazio di varianti e successivamente confrontato con filtri di producibilità definiti entro regimi differenti. La tesi dimostra quindi la trasferibilità del principio, non la riproducibilità indiscriminata delle sue istanze. È questo aspetto a permettere di parlare di generalizzazione senza ricadere in formulazioni totalizzanti: il modello può essere esteso là dove sia possibile riconoscere una struttura generativa formalizzabile, una parametrizzazione controllabile e un processo produttivo traducibile in criteri di verifica operativi.

Su questa base, le estensioni future del modello possono essere delineate secondo tre direzioni principali. Una prima direzione è teorica e riguarda l’ampliamento della classe di sistemi morfogenetici impliciti parametrici oltre le famiglie investigate nella tesi. Il lavoro svolto rende pensabile l’estensione del core verso altre morfologie continue, iterative o ibride, purché esse possano essere ricondotte a una struttura formalizzabile e a un dominio parametrico coerente. In questa prospettiva, lo sviluppo futuro consisterebbe nel verificare fino a che punto la classe astratta individuata nel paragrafo 7.2 possa essere estesa senza perdere continuità logica. Ciò che re-

sta da esplorare, dunque, è il confine teorico entro cui il modello mantiene la propria identità.

Una seconda direzione è metodologica e riguarda l'espansione del framework rispetto ai processi di verifica e ai regimi produttivi. La tesi ha mostrato che la relazione tra sistema generativo e sistema produttivo può essere dimostrata attraverso regimi multipli; resta aperta la possibilità di articolare ulteriormente tale logica introducendo filtri di producibilità più complessi, simulazioni più integrate o passaggi di regime ancora più differenziati. Anche qui, tuttavia, l'estensione non va intesa come semplice aumento di complessità tecnica. Il punto metodologicamente rilevante sarebbe verificare se la struttura **Algoritmo** → **Variazione** → **Producibilità** mantenga coerenza anche quando il sistema produttivo incorpori ulteriori variabili, materiali o condizioni di controllo. In tal senso, il futuro del modello coincide con la prova della sua tenuta entro ecologie produttive più articolate.

Una terza direzione, infine, è applicativa e riguarda il possibile trasferimento del modello verso contesti progettuali e costruttivi differenti per scala, materiale o finalità. Anche in questo caso, però, l'estensione non può essere pensata in termini meramente espansivi. La tesi dimostra che esiste una struttura attraverso cui problemi diversi possono essere interrogati in modo comparabile, a condizione che ne condividano i presupposti formali e produttivi essenziali. Il valore applicativo del modello risiede quindi meno nella promessa di un impiego illimitato che nella possibilità di offrire un criterio di organizzazione per nuovi campi di sperimentazione.

Formulate in questi termini, generalizzazione ed estensioni future non indeboliscono la chiusura della tesi, ma la completano. Al tempo stesso, proprio perché questo risultato è stato circoscritto con rigore, esso apre un campo di ricerca ulteriore senza confondere il possibile con il già dimostrato. La tesi si chiude quindi con un'apertura controllata: ciò che viene lasciato al futuro non è ciò che manca alla dimostrazione, ma ciò che la dimostrazione stessa rende ora pensabile.

In questo senso, il modello morfogenetico implicito parametrico può essere trattenuto come contributo stabile e, insieme, come soglia teorica. Stabile, perché definisce una struttura riconoscibile di relazioni tra formalizzazione, variazione e producibilità. Soglia, perché invita a verificare fino a che punto tale struttura possa essere estesa oltre il perimetro qui investigato senza perdere la propria coerenza. È in questa doppia condizione — compimento e apertura, delimitazione e prospettiva — che la tesi trova la sua chiusura più rigorosa: la possibile definizione di un campo di ricerca che, pro-

prio grazie alla precisione della dimostrazione raggiunta, può ora essere ulteriormente sviluppato.

7.5 Linee operative per una validazione estesa

A partire dalla generalizzazione delineata nel paragrafo precedente, la prosecuzione della ricerca può essere orientata verso una validazione estesa del framework. Il passaggio successivo riguarda la trasformazione della trasferibilità teorica in protocolli sperimentali capaci di misurare la tenuta del modello in condizioni morfogenetiche, produttive e valutative più articolate. In questa prospettiva, l'obiettivo futuro consiste nel verificare come la struttura **Algoritmo** → **Variazione** → **Producibilità** possa operare quando aumentano il grado di località della variazione, la complessità del regime produttivo e il numero dei criteri di controllo.

Una prima linea operativa riguarda l'introduzione di campi morfogenetici non uniformi. Le sperimentazioni condotte hanno privilegiato sistemi nei quali la variazione parametrica mantiene una leggibilità globale; un avanzamento significativo consisterebbe nell'applicare il framework a configurazioni in cui parametri, soglie e condizioni di generazione variano localmente nello spazio. Gradienti differenziati, anisotropie, campi adattivi e vincoli distribuiti permetterebbero di valutare la capacità del core algoritmico di rispondere a sollecitazioni più specifiche, mantenendo una coerenza operativa tra regola generativa e condizioni di producibilità.

Una seconda linea riguarda l'integrazione di filtri produttivi più dinamici. Nei casi analizzati, la producibilità interviene attraverso verifiche geometriche, procedurali e di regime; ricerche successive potranno estendere questa logica verso processi capaci di incorporare dati di simulazione, comportamento del materiale, feedback macchina e correzioni durante la fabbricazione. Stampa multi-materiale, robotica adattiva, processi ibridi e sistemi di cassaforma avanzati costituirebbero contesti utili per osservare come il modello reagisce a condizioni produttive meno stabili e maggiormente dipendenti dall'interazione tra geometria, materia e controllo.

Una terza linea riguarda la costruzione di criteri comparativi più espliciti. La validazione futura potrà essere rafforzata attraverso indicatori capaci di descrivere la convergenza del processo: numero di iterazioni, accuratezza geometrica, tempo di lavorazione, consumo di materiale, stabilità del prototipo, accessibilità utensile, costo computazionale, scarto prodotto e coerenza tra previsione digitale e risultato fisico. Tali criteri permetterebbero di confrontare confi-

gurazioni diverse entro una medesima famiglia morfogenetica, oppure di valutare lo stesso core attraverso regimi produttivi differenti.

Queste linee operative precisano la proiezione sperimentale della tesi. Il modello raggiunto definisce un quadro metodologico stabile e apre una fase successiva di verifica, orientata a campi di prova più complessi, nei quali la relazione tra generazione, variazione e producibilità possa essere valutata con maggiore granularità. In questo modo, la generalizzazione concettuale viene trasformata in una possibile agenda di ricerca sperimentale.

In una prospettiva più ampia, tale agenda può contribuire alla costruzione di una maggiore autonomia progettuale nel passaggio dalla forma alla produzione. Se il CAD parametrico ha reso più accessibile la costruzione di geometrie complesse e gli algoritmi morfogenetici hanno ampliato lo spazio delle soluzioni formali generabili, l'automazione della validazione produttiva rappresenta un passaggio successivo: rendere più accessibile la materializzazione. Il futuro del framework può quindi essere letto come il tentativo di ridurre la distanza tra capacità generativa e capacità produttiva, trasformando la producibilità da competenza specialistica isolata a criterio operativo incorporato nel processo di progetto.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Oxman, R. Theory and Design in the First Digital Age. *Des. Stud.* **2006**, 27 (3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>.
- (2) Aish, R.; Woodbury, R. Multi-Level Interaction in Parametric Design. In *Smart Graphics*; Butz, A., Fisher, B., Krüger, A., Olivier, P., Eds.; Hutchison, D., Kanade, T., Kittler, J., Kleinberg, J. M., Mattern, F., Mitchell, J. C., Naor, M., Nierstrasz, O., Pandu Rangan, C., Steffen, B., Sudan, M., Terzopoulos, D., Tygar, D., Vardi, M. Y., Weikum, G., Series Eds.; Lecture Notes in Computer Science; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2005; Vol. 3638, pp 151–162. https://doi.org/10.1007/11536482_13.
- (3) Caetano, I.; Santos, L.; Leitão, A. Computational Design in Architecture: Defining Parametric, Generative, and Algorithmic Design. *Front. Archit. Res.* **2020**, 9 (2), 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>.
- (4) *Architecture in the Digital Age*, 0 ed.; Kolarevic, B., Ed.; Taylor & Francis, 2004. <https://doi.org/10.4324/9780203634561>.
- (5) *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*; Menges, A., Ed.; Architectural design Profile; Wiley: Chichester, 2012.
- (6) Sangiorgio, V.; Parisi, F.; Fieni, F.; Parisi, N. The New Boundaries of 3D-Printed Clay Bricks Design: Printability of Complex Internal Geometries. *Sustainability* **2022**, 14 (2), 598. <https://doi.org/10.3390/su14020598>.
- (7) Sheil, B. *Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture*, 1st ed.; AD Reader Ser; John Wiley & Sons, Incorporated: Chichester, 2012.
- (8) Oxman, N.; Rosenberg, J. L. Material-Based Design Computation An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators. *Int. J. Archit. Comput.* **2007**, 5 (1), 25–44. <https://doi.org/10.1260/147807707780912985>.
- (9) Menges, A. Biomimetic Design Processes in Architecture: Morphogenetic and Evolutionary Computational Design. *Bioinspir. Biomim.* **2012**, 7 (1), 015003. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015003>.
- (10) Roudavski, S. Towards Morphogenesis in Architecture. *Int. J. Archit. Comput.* **2009**, 7 (3), 345–374. <https://doi.org/10.1260/147807709789621266>.
- (11) Hensel, M.; Menges, A. Designing Morpho-Ecologies: Versatility and Vicissitude of Heterogeneous Space. *Archit. Des.* **2008**, 78 (2), 102–111. <https://doi.org/10.1002/ad.648>.

- (12) *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Technologies in Architecture*; Schodek, D., Schodek, D., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, 2005.
- (13) *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*; Gramazio, F., Kohler, M., Willmann, J., Eds.; Park Books: Zurich, 2014.
- (14) Leach, N. Digital Morphogenesis. *Archit. Des.* **2009**, *79* (1), 32–37. <https://doi.org/10.1002/ad.806>.
- (15) Oxman, N. Material-Based Design Computation. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010. <http://hdl.handle.net/1721.1/59192>.
- (16) Menges, A. The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction. *Archit. Des.* **2015**, *85* (5), 28–33. <https://doi.org/10.1002/ad.1950>.
- (17) Thompson, D. W. *On Growth and Form*, An abridged ed., 10. printing.; Bonner, J. T., Ed.; Canto; Cambridge University Press: Cambridge, 2010.
- (18) *An Evolutionary Architecture: Published to Coincide with an Exhibition Held at the Architectural Association from 27 January to 25 February 1995*; Frazer, J., Architectural Association London, Eds.; Architectural Association: London, 1995.
- (19) *Introduction to Implicit Surfaces*; Bloomenthal, J., Bajaj, C., Bajaj, C., Eds.; The Morgan Kaufmann series in computer graphics and geometric modeling; Morgan Kaufmann: San Francisco, California, 1997.
- (20) Osserman, R. *A Survey of Minimal Surfaces*; Dover Publications: New York, 1986.
- (21) Mandelbrot, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*; Echo Point Books & Media: Brattleboro, Vermont, 2022.
- (22) Lorensen, W. E.; Cline, H. E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.* **1987**, *21* (4), 163–169. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>.
- (23) Vantighem, G.; Ooms, T.; De Corte, W. FEM Modelling Techniques for Simulation of 3D Concrete Printing. arXiv 2020. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2009.06907>.
- (24) Sass, L. Synthesis of Design Production with Integrated Digital Fabrication. *Autom. Constr.* **2007**, *16* (3), 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.06.002>.
- (25) Oxman, R. Informed Tectonics in Material-Based Design. *Des. Stud.* **2012**, *33* (5), 427–455. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.05.005>.
- (26) *The Routledge Companion for Architecture Design and Practice*, 0 ed.; Kanaani, M., Kopec, D., Eds.; Routledge, 2015. <https://doi.org/10.4324/9781315775869>.

- (27) *Digital Materiality in Architecture: Gramazio & Kohler*; Gramazio, F., Kohler, M., Hanak, M., Eds.; Müller: Baden, 2008.
- (28) Oxman, R. Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues. *Int. J. Archit. Comput.* **2008**, *6* (1), 1–17. <https://doi.org/10.1260/147807708784640090>.
- (29) Shea, K.; Aish, R.; Gourtovaia, M. Towards Integrated Performance-Driven Generative Design Tools. *Autom. Constr.* **2005**, *14* (2), 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002>.

Questa ricerca esplora la formalizzazione
computazionale di processi morfogenetici
impliciti e il loro rapporto con la
fabbricazione digitale, mettendo in relazione
modelli generativi, parametri di producibilità
e sperimentazione materica.

Settore Scientifico-Disciplinare:

ICAR/13- Disegno Industriale

Curriculum:

Computational Design
e Digital Fabrication

Tutor:

Prof. Arch. Nicola Parisi