

ARTICLE INFO

Received	10 March 2026
Revised	15 April 2026
Accepted	17 April 2026
Published	30 June 2026

SUPERFICI COME INFRASTRUTTURE

Design e manifattura additiva nell'Industria 5.0

SURFACES AS INFRASTRUCTURE

Design and additive manufacturing in Industry 5.0

Gianpiero Alfarano, Alessandro Spennato, Jurji Filieri

ABSTRACT

Il contributo indaga il ruolo delle superfici modulari progettate mediante manifattura additiva come sistemi capaci di integrare innovazione tecnologica, modularità e qualità percettive dello spazio. La ricerca adotta un approccio di 'design research' basato sull'integrazione tra modellazione parametrica e prototipazione tramite stampa 3D, finalizzato allo sviluppo di moduli di superficie caratterizzati da una serialità variabile. Attraverso la manipolazione controllata di parametri geometrici sono state generate configurazioni morfologiche in grado di produrre effetti visivi e spaziali diversi. I risultati mostrano come la combinazione tra progettazione digitale e fabbricazione additiva consenta di sviluppare sistemi di superficie flessibili e riconfigurabili, con potenziali applicazioni nel design degli interni e nell'architettura. Il contributo evidenzia inoltre le implicazioni di tali strategie progettuali sui modelli di innovazione sostenibile e sugli obiettivi dell'Agenda 2030.

The paper investigates the role of modular surfaces designed through additive manufacturing as systems capable of integrating technological innovation, modularity and perceptual qualities of space. The research adopts a 'design research' approach based on the integration of parametric modelling and prototyping through 3D printing, aimed at the development of surface modules characterised by variable seriality. Through the controlled manipulation of geometric parameters, morphological configurations were generated that can produce different visual and spatial effects. The results show that combining digital design and additive manufacturing enables the development of flexible, reconfigurable surface systems with potential applications in interior design and architecture. The paper also highlights the implications of such design strategies on sustainable innovation models and the 2030 Agenda goals.

KEYWORDS

design sostenibile, manifattura additiva, superfici sensoriali, innovazione industriale, industria 5.0

sustainable design, additive manufacturing, sensory surfaces, industrial innovation, industry 5.0

Gianpiero Alfarano, Architect and Designer, is an Associate Professor of Design at the University of Florence (Italy). Scientific Coordinator of the Master's programme in Advanced Interior Design and of the Lighting Colour Surface Lab, he deals with colours, materials, finishes and lighting, and conducts research on perception, energy efficiency of surfaces, and photoluminescent pigments. E-mail: gianpiero.alfarano@unifi.it

Alessandro Spennato, Designer, is an Adjunct Lecturer in Interior Design, Technician at the Models for Design Laboratory and Coordinator of the Lighting Colour Surface Lab at the University of Florence (Italy). He works on interior design, product design, graphics and digital prototyping. E-mail: alessandro.spennato@unifi.it

Jurji Filieri, Architect and Designer, is a Researcher and Lecturer on the Design degree course at the University of Tuscia (Italy). He is the Scientific Coordinator of UNISOL and Unusual Research Lab, an experimental research group on design and production processes for companies, and he carries out research in the fields of relational design, innovation, and the influence of art on design. E-mail: jurji.filieri@unitus.it



Nel contesto contemporaneo segnato da una sempre più articolata polycrisi ambientale, sociale ed economica il progetto è chiamato a ripensare modelli produttivi, infrastrutture materiali e processi di innovazione che caratterizzano l'ambiente costruito. L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015) individua nell'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 9 (Fig. 1) un asse strategico per promuovere industrie resilienti, infrastrutture sostenibili e sistemi di innovazione capaci di integrare sviluppo economico, sostenibilità ambientale e progresso sociale. Il dibattito scientifico evidenzia che tali trasformazioni richiedono approcci progettuali sistemici in grado di connettere tecnologia, produzione e responsabilità ambientale (Fig. 2).

In questo scenario si colloca l'evoluzione verso i paradigmi dell'Industria 5.0. Il passaggio al nuovo paradigma dall'Industria 4.0 si caratterizza infatti per un'evoluzione sostanziale delle integrazioni tecnologiche, organizzative e valoriali che ridefiniscono il ruolo della manifattura nei sistemi socio-economici. Se l'Industria 4.0 ha privilegiato l'integrazione verticale e orizzontale dei sistemi cyberfisici, l'interconnessione IoT e l'analisi dei big data per massimizzare l'efficienza e la produttività, l'Industria 5.0 amplia tale architettura, verso l'integrazione sistemica orientata alla sostenibilità ambientale, alla resilienza delle catene del valore e alla centralità dell'essere umano. Le tecnologie digitali avanzate – tra cui le manifatture digitali – non sono più finalizzate esclusivamente all'ottimizzazione delle performance operative, ma vengono integrate con obiettivi di riduzione dell'impatto ambientale, di flessibilità adattiva e di personalizzazione di massa.

In questo quadro la manifattura additiva rappresenta un abilitatore chiave, poiché integra progettazione generativa, produzione distribuita e uso efficiente delle risorse, favorendo modelli produttivi circolari e decentralizzati. L'integrazione uomo-macchina assume inoltre una dimensione qualitativa, valorizzando competenze, creatività e benessere dei lavoratori, in una logica di co-creazione del valore che talvolta coinvolge anche il bacino di utenza, abilitando nuove modalità di consumo e fruizione. Il design assume un ruolo di mediazione tra ricerca tecnologica, produzione e società, contribuendo alla definizione di modelli di sviluppo nei quali materiali, processi produttivi e dimensioni percettive del progetto vengono considerati in modo integrato (European Commission, 2021; Maddikunta et alii, 2022).

All'interno di questo quadro le superfici stanno progressivamente assumendo un ruolo centrale nel progetto contemporaneo. Tradizionalmente considerate elementi di finitura, esse sono oggi reinterpretate come dispositivi attivi capaci di mediare tra materia, percezione e prestazioni ambientali. Il design delle superfici contribuisce infatti alla costruzione delle qualità sensoriali dello spazio, trasformando il rivestimento in un sistema progettuale che integra dimensioni estetiche, tecniche e comunicative (Carullo and Pagliarulo, 2013; Sully, 2024): in questa prospettiva la materia diventa un agente progettuale capace di generare relazioni tra tecnologia, percezione e ambiente (Antonelli and Burckhardt, 2020).

Analogamente la diffusione delle tecnologie di fabbricazione digitale e della manifattura additiva sta ridefinendo il rapporto tra progettazione e produzione: la stampa 3D consente di realizzare geo-

metrie complesse mantenendo una forte continuità tra modello digitale e artefatto fisico (Fig. 3), introducendo nuove filiere relazionali tra progettazione e produzione, in cui la complessità geometrica diventa una variabile controllabile e non più un limite operativo (Gibson et alii, 2021; Thompson et alii, 2016). Diversi studi evidenziano inoltre il ruolo crescente della manifattura additiva nei processi di innovazione industriale e nelle strategie di personalizzazione dei prodotti, ad esempio attraverso la progettazione personalizzata e la personalizzazione di massa (Srivastava and Rathee, 2022).

Queste trasformazioni si collocano all'interno della cosiddetta 'seconda svolta digitale', in cui il progetto non si limita alla definizione formale degli oggetti, ma si estende alla configurazione dei processi che ne determinano la produzione e la materializzazione. In questo scenario la progettazione computazionale e la fabbricazione digitale diventano strumenti complementari per lo sviluppo di sistemi progettuali caratterizzati da elevata complessità morfologica e da variabilità formale.

Nonostante il crescente interesse per tali tecnologie, il dibattito scientifico tende ancora a trattare separatamente le ricerche sulla fabbricazione additiva e gli studi sul design delle superfici. Rimane quindi poco esplorata una prospettiva integrata che interpreti la superficie come sistema progettuale attraverso il quale connettere il processo produttivo, la configurazione morfologica e l'esperienza percettiva. Alcuni studi suggeriscono tuttavia che le superfici possano essere interpretate come dispositivi complessi in cui convergono dimensioni tecnologiche, ambientali e culturali (Gasparini, 2023).

Alla luce di queste premesse il contributo propone una rilettura delle superfici progettuali come infrastrutture di innovazione capaci di integrare ricerca progettuale, sperimentazione tecnologica e sostenibilità. L'articolo presenta i risultati di una ricerca sperimentale orientata allo sviluppo di moduli di superficie generati mediante modellazione parametrica e realizzati con tecnologie di manifattura additiva. L'obiettivo è indagare come la progettazione modulare e la stampa 3D possano contribuire alla definizione di sistemi di superficie variabili e flessibili, capaci di rispondere efficacemente a condizioni ambientali in continua evoluzione e a requisiti di utenza personalizzabili. Il contributo si inserisce nel dibattito internazionale sul ruolo del design nei processi di innovazione sostenibile e propone un approccio metodologico replicabile che integra la progettazione digitale, la prototipazione e l'osservazione critica dei risultati.

Stato dell'arte: superfici progettuali, manifattura additiva e modularità

Negli ultimi anni il progetto contemporaneo ha progressivamente ridefinito il ruolo delle superfici nell'ambiente costruito, superando l'interpretazione tradizionale che le considerava semplici elementi di finitura. La letteratura evidenzia come la superficie possa essere intesa come un dispositivo capace di integrare dimensioni tecnologiche, ambientali e percettive, contribuendo alla costruzione delle qualità sensoriali dello spazio architettonico e del prodotto industriale (Sully, 2024). Al fine di rafforzare il quadro teorico e verificare il posizionamento della ricerca rispetto al dibattito internazionale, sono stati selezionati alcuni casi studio recenti che affrontano il tema della superficie in relazione alla manifattura additiva, alla modularità e alle prestazioni percettive. La selezio-

ne è stata condotta secondo i seguenti criteri: a) utilizzo di tecnologie di fabbricazione digitale o additiva; b) presenza di un sistema superficiale modulare o parametrico; c) integrazione tra configurazione geometrica, comportamento del materiale e qualità percettive; d) rilevanza nel panorama della ricerca o della pratica progettuale contemporanea (Tab. 1).

Tale interpretazione trova riscontro nei casi studio analizzati nei quali la superficie non si limita a mediare relazioni, ma contribuisce direttamente alla definizione delle prestazioni del sistema. In particolare, mentre il MX3D Bridge rappresenta un esempio di applicazione della manifattura additiva orientata principalmente alla scala strutturale, i casi del BUGA Fibre Pavilion e delle facciate stampate in sabbia mostrano una maggiore integrazione tra geometria, comportamento materiale e qualità percettive (Dillenburger et alii, 2018). Tuttavia emerge una criticità comune legata alla trasferibilità dei sistemi sviluppati, spesso limitata da costi elevati, dalla complessità dei processi o dalle difficoltà di integrazione nelle filiere produttive tradizionali. In questo quadro la modularità si configura come elemento chiave per rendere tali approcci più scalabili, consentendo di mediare tra la variabilità progettuale e la fattibilità costruttiva.

In questa prospettiva la superficie si configura come un'interfaccia tra materia, ambiente e percezione, assumendo un ruolo attivo nell'esperienza spaziale. Nel design e nell'architettura l'involucro e il rivestimento rappresentano oggi il punto di convergenza di un duplice campo d'interesse: il primo riguarda la sensibilizzazione della superficie orientata a favorire nuove modalità di interazione, l'altro ne coinvolge l'aspetto comunicativo sul piano dell'interazione visiva. In entrambi i casi la superficie assume un ruolo di mediazione, in cui aspetti tecnologici, sinestetici o culturali convivono nell'ambito del progetto (Dal Buono and Scodeller, 2016).

A tali riflessioni si affiancano studi recenti che evidenziano come le proprietà percettive dei materiali – in particolare la texture, la naturalità apparente e la configurazione superficiale – influenzino in modo significativo la qualità percepita degli ambienti interni e la risposta degli utenti. In particolare ricerche sperimentali dimostrano che superfici caratterizzate da maggiore articolazione materica e complessità geometrica producono variazioni percettive misurabili in termini di comfort visivo e valutazione estetica (Zhang, Song and Luo, 2023; Wenginger et alii, 2024): tali contributi rafforzano l'interpretazione della superficie come dispositivo attivo nella costruzione dell'esperienza spaziale. In questa prospettiva il progetto può essere interpretato come un dispositivo di mediazione tra variabili eterogenee, capace di organizzare relazioni complesse tra parametri materiali, tecnologici e percettivi, secondo logiche non lineari (Mascitti and Paciotti, 2024).

Una parte significativa della ricerca contemporanea indaga il rapporto tra la progettazione materica e l'innovazione tecnologica; il concetto di 'design guidato dai materiali' ha ridefinito l'integrazione dei materiali nel processo progettuale, evidenziando come le proprietà sensoriali e performative della materia possano orientare lo sviluppo delle soluzioni progettuali (Karana et alii, 2015): approcci interdisciplinari come la 'ecologia dei materiali' (Oxman et alii, 2015) hanno ampliato la riflessione sul ruolo dei materiali integrando dimensioni biolo-



Fig. 1 | Sustainable Development Goal 9 of Agenda 2030, dedicated to the promotion of resilient infrastructure, innovation and sustainable industrialisation (credit: R. Rastelli, 2022).

Next page

Fig. 2 | Conceptual diagram relating global polycrisis, sustainable transition, Industry 5.0 paradigms and the role of design in the development of modular surface systems based on parametric design and additive manufacturing (credit: the Authors, 2026).

giche, tecnologiche e ambientali nei sistemi progettuali. Questa evoluzione è strettamente connessa allo sviluppo delle tecnologie digitali per la progettazione e la fabbricazione.

In quest'ottica la modellazione computazionale e i sistemi parametrici assumono un ruolo centrale nel controllo della complessità geometrica e nella gestione della variabilità progettuale. Studi recenti evidenziano come l'utilizzo di modelli impliciti e algoritmici consenta una maggiore coerenza tra la fase di progettazione e quella di produzione additiva, rendendo possibile la generazione di superfici complesse direttamente compatibili con i processi di fabbricazione (Li et alii, 2018). Ciò contribuisce a superare la tradizionale separazione tra forma e processo, integrando sin dalle prime fasi progettuali logiche costruttive e prestazionali.

Gli strumenti di modellazione parametrica consentono di generare sistemi morfologici complessi con variazioni controllate di geometria e densità, favorendo la creazione di superfici in grado di produrre effetti spaziali differenziati: in questo contesto la cosiddetta 'seconda svolta digitale' ha ridefinito il rapporto tra progetto e produzione, estendendo il ruolo del design alla configurazione dei processi di materializzazione dell'artefatto (Carpo, 2017).

Parallelamente la diffusione della manifattura additiva ha introdotto trasformazioni significative nei processi produttivi, consentendo la realizzazione di geometrie complesse difficilmente ottenibili con metodi industriali tradizionali. La stampa 3D permette infatti di produrre componenti con elevata complessità morfologica (Fig. 4) mantenendo continuità tra modello digitale e artefatto fisico (Gibson et alii, 2021). Diversi studi evidenziano inoltre il ruolo crescente della manifattura additiva nei processi di innovazione industriale e nelle strategie di personalizzazione dei prodotti (Srivastava and Rathee, 2022; Bollzan, 2020).

Ulteriori contributi evidenziano come la manifattura additiva stia progressivamente evolvendo da tecnologia di prototipazione a sistema produttivo avanzato, capace di incidere sui modelli di sviluppo del prodotto, sulla customizzazione e sulla gestione della complessità geometrica. In particolare le revisioni sistematiche sul tema sottolineano

come la stampa 3D consenta di integrare forma, funzione e prestazione in un unico processo, aprendo nuove possibilità per la progettazione di superfici articolate e performative (Ngo et alii, 2018); ma emergono anche criticità legate a costi, tempi e alla scalabilità industriale, che rendono necessaria una valutazione integrata tra le potenzialità formali e le condizioni produttive (Yang and Zhao, 2015).

Nel campo dell'architettura e del design queste trasformazioni hanno favorito ricerche orientate alla sperimentazione di componenti e sistemi modulari. In questa prospettiva la modularità non può essere interpretata esclusivamente come principio di serialità, ma come strategia per la gestione della complessità e dell'adattività dei sistemi di involucro, capace di integrare variabilità, prestazioni e controllo progettuale (Manni and Valzano, 2023). In tale contesto recenti ricerche mostrano come l'integrazione tra design parametrico, fabbricazione digitale e costruzione modulare consenta di trasferire la variabilità progettuale in sistemi costruibili e assemblabili anche a scala architettonica.

Alcuni studi dimostrano come la combinazione tra componenti modulari e processi additivi permetta di realizzare strutture complesse mantenendo elevati livelli di controllo geometrico e adattabilità (Su et alii, 2023). Parallelamente l'uso dei materiali come strumenti progettuali evidenzia la possibilità di integrare prestazioni, sostenibilità ed espressività all'interno di un unico sistema, rafforzando il ruolo del design nella gestione della complessità (Dahy, 2023). Altri studi hanno esplorato l'utilizzo della stampa 3D per la realizzazione di elementi architettonici con prestazioni integrate (Doubrovski, Verlinden and Geraedts, 2012) ed altri ancora hanno indagato la progettazione di materiali programmabili e sistemi costruttivi adattivi (Correa et alii, 2023; Morbiducci, Poverino and Battaglia, 2023). Non mancano poi recenti studi che evidenziano il ruolo della fabbricazione digitale come strumento in grado di integrare innovazione tecnologica e sostenibilità nei processi architettonici (Dahy, 2023).

Il rapporto tra modularità e sostenibilità entra dunque a pieno diritto nel dibattito sulla transizione verso modelli di economia circolare: il design modulare è considerato una strategia capace di incre-

mentare la durabilità dei prodotti e di facilitare manutenzione, riparazione e rifabbricazione (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023), contribuendo alla riduzione del consumo di risorse (EMF, 2021) e allo sviluppo di pratiche di consumo e gestione dei manufatti non lineari, iterativi.

In questa direzione ricerche sull'architettura responsiva evidenziano come l'intelligenza del sistema possa essere incorporata direttamente nella materia e nella configurazione geometrica, riducendo la dipendenza da sistemi tecnologici attivi e favorendo strategie passive a basso consumo energetico (Holstov, Bridgens and Farmer, 2017), mentre studi sull'impiego della manifattura additiva mostrano come l'efficacia di tali tecnologie dipenda dalla loro integrazione all'interno di sistemi produttivi, decisionali e progettuali coerenti, nei quali modularità, materiali e obiettivi ambientali siano assunti entro una prospettiva integrata (Raffaelli et alii, 2021).

Accanto alle questioni tecnologiche emerge il tema della complessità dei sistemi progettuali contemporanei, caratterizzati da interazioni tra fattori tecnici, ambientali e sociali che richiedono approcci interdisciplinari (Porfirione, Ferrari Tumay, Leggiero, 2024): in questo contesto il design può essere interpretato come una pratica di mediazione tra attori, tecnologie e processi produttivi (Celaschi, Casoni and Formia, 2024), mentre studi sulla transizione circolare evidenziano il coinvolgimento di diversi attori lungo la filiera industriale (Maffei et alii, 2024).

Nonostante la crescente diffusione della ricerca sulla fabbricazione digitale e sul design delle superfici, la letteratura evidenzia una scarsa integrazione sistemica tra gli studi sulla superficie, sulla modularità e sulla manifattura additiva. In particolare mentre la letteratura sulla manifattura additiva sottolinea le opportunità legate alla libertà geometrica e alla personalizzazione, e gli studi sulla percezione evidenziano l'importanza delle qualità materiche e superficiali nella definizione dell'esperienza spaziale, manca ancora una riflessione pienamente integrata che metta in relazione questi ambiti all'interno di un unico quadro metodologico. Questo disallineamento evidenzia la necessità di consi-

derare la superficie come infrastruttura progettuale, capace di connettere il processo digitale, l'organizzazione modulare e il comportamento percettivo. In questo senso la superficie è parte integrante del sistema dell'involucro, in cui il rapporto tra modulo, misura e costruzione definisce non solo la configurazione formale, ma anche il comportamento complessivo del sistema architettonico (Scala, 2023).

Metodologia e fasi della ricerca | La ricerca si colloca nel campo della 'design research' applicata alla sperimentazione materica e tecnologica e adotta un approccio metodologico iterativo che integra progettazione parametrica, fabbricazione digitale e osservazione critica dei prototipi. L'impostazione si basa sul paradigma della 'research-through-design', in cui la conoscenza emerge attraverso il processo progettuale e la produzione di artefatti sperimentali capaci di verificare le relazioni tra forma, materia e prestazioni percettive (Frayling, 1994; Zimmerman, Stolterman and Forlizzi, 2010). In questo quadro il progetto diventa uno strumento di indagine basato su cicli successivi di progettazione, prototipazione e validazione, teso a produrre un modello di produzione replicabile, non chiuso, aggiornabile o correggibile.

L'obiettivo metodologico è esplorare le potenzialità della manifattura additiva nella progettazione di sistemi di superficie modulari caratterizzati da variazioni controllate di geometria e di profondità. L'ipotesi presuppone che la combinazione tra progettazione parametrica e stampa 3D possa favo-

rire sistemi a serialità variabile, in cui la modularità non coincide con la ripetizione identica degli elementi, bensì con la variazione controllata dei parametri progettuali. Tale impostazione è coerente con gli approcci del Design for Additive Manufacturing (Fig. 5) che propongono di integrare le logiche della fabbricazione additiva fin dalle prime fasi del progetto (Thompson et alii, 2016).

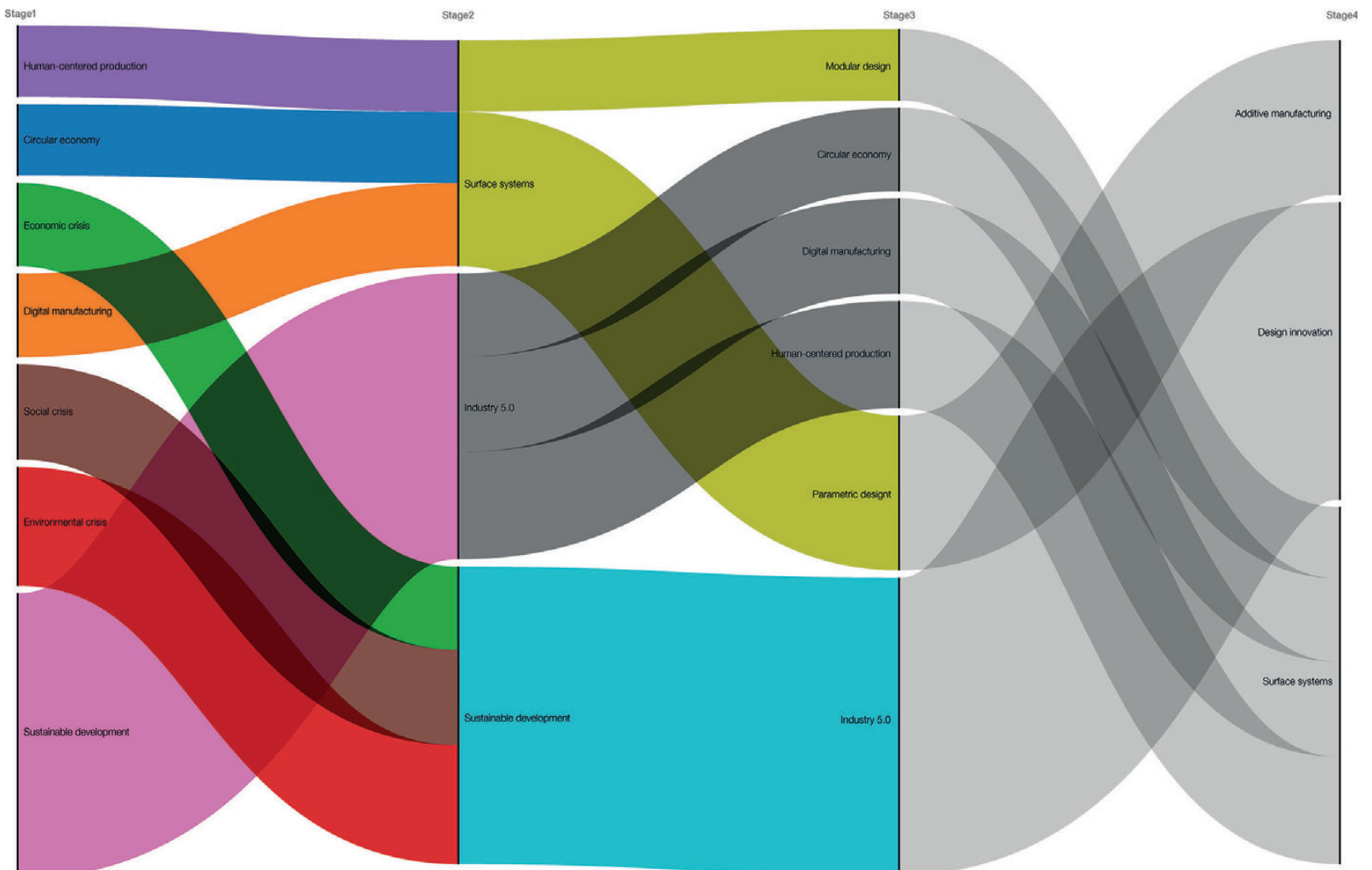
Il protocollo di ricerca è stato articolato in una sequenza che collega la progettazione digitale, la prototipazione fisica e l'analisi dei risultati. La prima fase ha riguardato la definizione di un sistema parametrico per la generazione di moduli di superficie con variazioni morfologiche controllate. A partire da una matrice geometrica di base sono stati individuati parametri progettuali in grado di influenzare la configurazione dei moduli, tra cui la profondità del rilievo, la densità della texture e l'inclinazione delle superfici. La manipolazione di tali parametri ha consentito di generare una famiglia di moduli differenti ma riconducibili a una stessa logica generativa, attraverso la cui associazione combinatoria la superficie intera (intesa in termini corali) acquista un proprio valore fisico e semantico.

La seconda fase ha riguardato la materializzazione dei modelli digitali mediante tecnologie di fabbricazione additiva. I moduli sono stati realizzati mediante stampa 3D con tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), che consente la deposizione stratificata di materiale termoplastico a partire da modelli tridimensionali. I prototipi sono stati realizzati in PLA, con spessore variabile tra 0,1 e 0,2 mm e riempimento compreso tra il 15% e il 30%, in fun-

zione delle caratteristiche morfologiche dei moduli. La scelta di questa tecnologia è legata alla sua diffusione nei contesti di prototipazione progettuale e alla possibilità di produrre componenti complessi, come evidenziato anche dalla letteratura sul ruolo della stampa 3D nello sviluppo di modelli produttivi flessibili (Bolzani, 2020).

Una volta realizzati i prototipi la terza fase ha mirato allo studio delle configurazioni aggregative dei moduli e delle implicazioni percettive evocate nei contesti ambientali di utenza o di allestimento. L'osservazione è stata condotta simulando diverse condizioni di illuminazione e confrontando le configurazioni ottenute mediante la combinazione dei moduli. L'attenzione si è concentrata sulla relazione tra morfologia della superficie, comportamento delle ombre e percezione visiva delle texture, in continuità con gli studi che indagano il ruolo della materia nella costruzione dell'esperienza sensoriale dello spazio (Karana et alii, 2015).

La fase finale ha riguardato la sistematizzazione dei risultati e la definizione di un repertorio di assemblaggi modulari, ciascuno ottenuto dalla combinazione dei moduli sviluppati. Tale repertorio rappresenta un sistema aperto di possibilità progettuali e dimostra come la serialità variabile possa generare superfici differenziate a partire da un numero limitato di componenti. La ricerca propone quindi un approccio metodologico replicabile, che integra la progettazione parametrica e la manifattura additiva come strumenti di sperimentazione progettuale nel campo delle superfici. Al fine di garantire la replicabilità del processo sperimentale si ri-



porta una sintesi del protocollo metodologico adottato, articolato in input, strumenti, parametri, esiti e criteri di valutazione (Tab. 2).

Per rafforzare il posizionamento metodologico della ricerca il protocollo sviluppato è stato confrontato con alcuni casi internazionali recenti relativi a sistemi di superficie additiva performativa, configurazioni parametrico-funzionali e involucri adattivi. I casi sono stati selezionati non tanto per affinità formale, quanto per la comparabilità del dispositivo sperimentale: in tutti è infatti riconoscibile una catena operativa che collega la definizione parametrica della geometria, la materializzazione tramite processi additivi e la verifica di una prestazione misurabile. In questo senso, il confronto consente di chiarire meglio i punti di forza, i limiti e la trasferibilità del presente contributo.

Un primo gruppo di precedenti riguarda le superfici additive ad alte prestazioni acustiche: nello studio sui pannelli microforati stampati in 3D con cavità multiple la variazione sistematica di parametri geometrici come diametro dei pori, rapporto di perforazione, spessore e profondità della retrocavità è stata verificata attraverso simulazione numerica e prova tecnica in tubo d'impedenza, mostrando che la differenziazione parametrica dei moduli può produrre un assorbimento più ampio in banda e più controllato rispetto a sistemi uniformi (Deepak et alii, 2024).

In questo caso l'elemento metodologicamente più rilevante consiste nel fatto che la variabilità non è assunta come semplice esito estetico, ma come dispositivo prestazionale suscettibile di verifica mediante un'osservazione prevalentemente quantitativa. Al tempo stesso tale riferimento mette in evidenza una prima differenza di sviluppo e un limite della ricerca qui presentata: se da un lato il

protocollo adottato analizza con accuratezza gli effetti percettivi di luce, ombra e texture attraverso un approccio sperimentale empirico e prevalentemente qualitativo, dall'altro non integra ancora una fase di misurazione strumentale delle prestazioni funzionali della superficie. Ne consegue che il contributo del paper risulta, allo stato attuale, più solido sul piano morfologico-percettivo che su quello metrologico-prestazionale e che la ricerca richiede un ulteriore sviluppo orientato alla raccolta di dati analitici mediante osservazione strumentale.

Un secondo riferimento è costituito dalle ricerche su metamateriali acustici regolabili integralmente e stampati in 3D, come il caso della cella risonante SLA con membrana magnetica, progettata per modificare la frequenza di risonanza dopo la fabbricazione (Gardiner et alii, 2024). Qui il punto di interesse non è soltanto la stampa di una geometria complessa, ma l'integrazione tra la fabbricazione additiva, il materiale funzionalizzato e il comportamento adattivo del componente. Rispetto a tale linea di ricerca il contributo qui proposto condivide l'idea di una geometria generativa aperta e di una produzione non standardizzata, ma se ne distingue perché lavora su un'adattività 'debole', affidata alla ricombinazione dei moduli e agli effetti percettivi contestuali, non a una trasformazione attiva o post-fabbricazione del componente (Figg. 6-8). Il confronto rende quindi esplicito che la trasferibilità del metodo è elevata per superfici modulari statiche o semi-variabili, mentre resta limitata nel caso di sistemi realmente responsivi o riconfigurabili in esercizio.

Un terzo campo di confronto riguarda le superfici biomimetiche orientate al grip e alla risposta tribologica. Uno studio recente su trame bioispirate realizzate in PLA mediante stampa 3D con

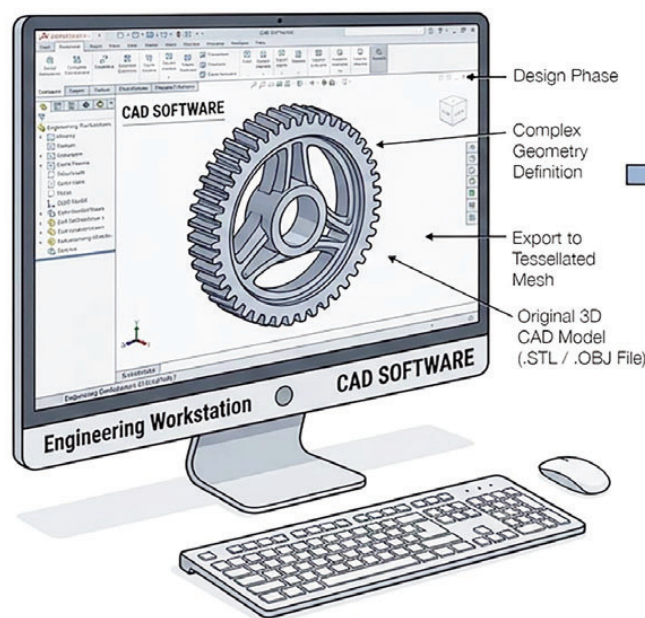
tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) ha indagato cinque texture derivate da modelli naturali, verificandone il comportamento in termini di attrito anisotropo e usura mediante prove di scorrimento reciproco. In questo caso, come nella presente ricerca, la superficie è intesa come interfaccia attiva tra geometria e comportamento, ma la procedura sperimentale si sposta da un'osservazione prevalentemente visivo-percettiva a una caratterizzazione quantitativa dell'interazione meccanica (paragonabile al primo caso studio citato).

Il parallelismo è particolarmente utile perché mostra ancora una possibile estensione metodologica del protocollo qui adottato: i parametri oggi usati per modulare profondità del rilievo, densità della trame e inclinazione delle superfici potrebbero essere messi in relazione, in studi successivi, anche con coefficienti di attrito, comfort aptico o resistenza all'usura, ampliando la trasferibilità del sistema verso applicazioni dove la performance tattile o di grip è centrale (Mzali et alii, 2024).

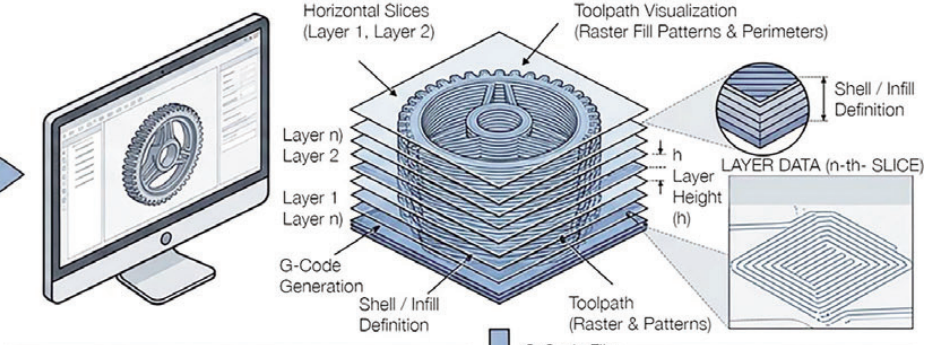
Un quarto termine di paragone è offerto dai più recenti studi sugli involucri adattivi 4D-printed, in particolare dal sistema di schermatura igromorfica a base biologica sviluppato per una facciata reale, nel quale strutture cellululosiche bistrato realizzate mediante la tecnologia FFF (Fused Filament Fabrication) sono state testate in laboratorio, monitorate per oltre un anno in condizioni atmosferiche reali e poi portate a scala architettonica. Questo caso è particolarmente rilevante perché mostra un avanzamento metodologico rispetto alla prototipazione di laboratorio: il ciclo progettazione-fabbricazione-test non si arresta alla verifica del campione, ma comprende anche prove di robustezza, verifiche di comportamento agli agenti atmosferici, il trasferimento alla scala architettonica e la dimostrazione

THE ADDITIVE MANUFACTURING WORKFLOW: FROM DESIGN TO LAYER-BY-LAYER FABRICATION

PHASE 1: DIGITAL CAD MODEL



PHASE 2: SLICING PROCESS



PHASE 3: PHYSICAL FABRICATION

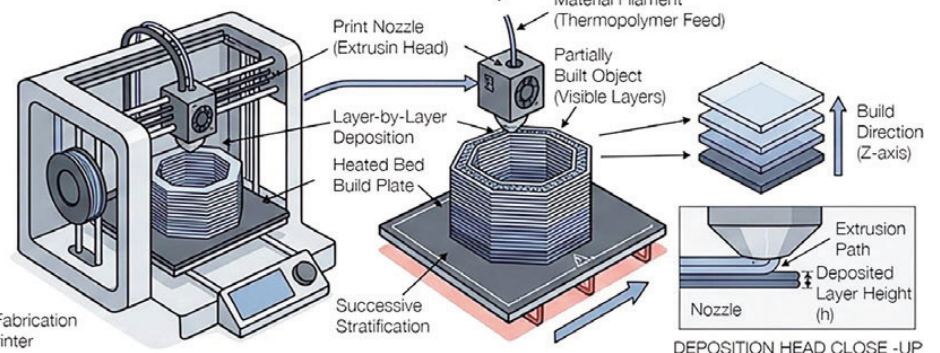


Fig. 3 | Schematic of the additive manufacturing process based on layered material deposition from a three-dimensional digital model. The workflow includes CAD modelling, slicing the model into layers, and sequential deposition of the material during 3D printing (credit: the Authors, 2026).

Case study	Technology	Modularity	Performance	Perceptual qualities	Limitations	Transferability
MX3D Bridge (Amsterdam)	Metal 3D printing (WAAM)	Low (continuous element)	Advanced structural engineering	Continuous surface and emerging texture	High costs and technical complexity	Limited to major infrastructure projects
BUGA Fibre Pavilion (ICD/ITKE, 2019)	Robotic manufacturing and composite fibres	Medium (separate components)	High structural and environmental performance	Highly developed material and perceptual articulation	A complex and non-standardised process	Transferability limited to experimental architecture
3D Printed Sand Mould Facade (ETH Zürich)	3D sand printing + casting	High (custom modules)	Environmental control and shading	Textural quality and variations in light	Material fragility and durability	Suitable for architectural facades

Tab. 1 | Comparison of international case studies on surfaces, modularity, and digital fabrication (credit: the Authors, 2026).

in opera. Rispetto a questo caso studio, la ricerca qui presentata si distingue per la costruzione di un repertorio aperto di assemblaggi e per la definizione di una grammatica modulare replicabile. Tuttavia la validazione dei risultati si colloca ancora soprattutto sul piano prototipale e percettivo-ambientale. Il confronto indica quindi, come sviluppo successivo necessario per rafforzarne il contributo scientifico, l'estensione del protocollo a prove di durabilità, a verifiche in condizioni d'uso e a test a scala applicativa.

Nel loro insieme questi precedenti consentono di precisare meglio il contributo specifico della presente ricerca, il cui punto di forza non consiste nell'introdurre una nuova performance tecnica in senso stretto, bensì nel proporre un metodo replicabile per costruire superfici modulari a serialità variabile, nelle quali la fabbricazione additiva è assunta come condizione che rende possibile l'articolazione controllata della differenza. In confronto ai casi prestazionali più avanzati lo studio presenta una maggiore accessibilità tecnologica – grazie all'uso di FDM e PLA, processi diffusi nei contesti di prototipazione progettuale – e una più immediata trasferibilità nei campi dell'interior, dell'allestimento e dei dispositivi di qualificazione percettiva delle superfici. D'altro canto la sua replicabilità è oggi soprattutto procedurale e geometrica, mentre la piena trasferibilità verso ambiti ad alta prestazione richiede l'integrazione di metriche quantitative, protocolli di test standardizzati e verifiche a scala d'uso (Tab. 3).

Il confronto con i casi recenti conferma che la presente ricerca si colloca in una linea di studi che usa la fabbricazione additiva non soltanto per produrre complessità formale, ma per costruire relazioni verificabili tra parametri geometrici, comportamento della superficie e qualità dell'esperienza. Entro tale quadro il contributo specifico del lavoro consiste nella definizione di un protocollo replicabile per superfici modulari a serialità variabile, la cui ulteriore evoluzione potrà riguardare l'integrazione di metriche prestazionali quantitative e la validazione a scala applicativa.

Risultati sperimentali | Al fine di rendere verificabile la relazione tra configurazioni morfologiche ed effetti percettivi, sono stati definiti criteri di valutazione specifici, applicati in modo sistematico ai prototipi sviluppati. Le metriche adottate, prevalentemente di natura qualitativa ma strutturate secondo parametri controllati, consentono di confrontare le diverse configurazioni in relazione alle prestazioni percettive generate dall'interazione tra luce e superficie. Le principali metriche di valutazione sono le seguenti:

a) contrasto ombra-luce – capacità della super-

ficie di generare differenze percettive tra zone illuminate e in ombra, in relazione alla profondità e all'inclinazione dell'articolazione superficiale;

b) variazione cromatica percepita – modificazione della percezione del colore in funzione dell'orientamento delle superfici e delle condizioni di illuminazione;

c) profondità visiva – grado di tridimensionalità percepita della superficie, legato alla stratificazione dei livelli e alla complessità geometrica;

d) leggibilità della trama – chiarezza e riconoscibilità della configurazione geometrica rispetto alla distanza e all'angolo di osservazione;

e) variabilità percettiva – capacità del sistema modulare di generare effetti differenti a partire da variazioni parametriche controllate.

Lo studio è stato condotto mantenendo costanti le condizioni di illuminazione e di osservazione, al fine di garantire la comparabilità dei risultati, mentre l'analisi dei prototipi è stata condotta applicando le metriche sopra descritte, per correlare in modo sistematico le variazioni parametriche agli effetti percettivi osservati. In particolare le configurazioni caratterizzate da maggiore profondità e inclinazione delle superfici hanno evidenziato un incremento significativo del contrasto ombra-luce e della profondità visiva, mentre quelle a densità più elevata hanno mostrato una riduzione della leggibilità ma un aumento della variabilità percettiva (Fig. 9).

La sperimentazione ha consentito di sviluppare un ampio repertorio di soluzioni formali / funzionali diversificate, caratterizzate da variazioni di forma controllate, attraverso la manipolazione parametrica di alcuni caratteri geometrici fondamentali (Figg. 10, 11). A partire da una matrice progettuale di base sono stati prodotti moduli con variazioni di profondità, incidenza luminosa e densità del materiale, la cui combinazione ha generato effetti percettivi diversi in funzione delle condizioni di illuminazione e della scala. I prototipi realizzati mediante stampa 3D hanno dimostrato che la manifattura additiva consente una forte continuità tra la modellazione digitale e la produzione fisica. La possibilità di produrre componenti complessi senza l'utilizzo di stampi o lavorazioni sottrattive ha permesso di mantenere elevata fedeltà tra la geometria progettata e il risultato materiale, confermando il ruolo della fabbricazione additiva nei processi di sperimentazione progettuale (Gibson et alii, 2021).

I risultati confermano la coerenza tra le ipotesi progettuali e gli effetti osservati, evidenziando il ruolo della variazione parametrica come strumento di controllo delle prestazioni percettive. I moduli sviluppati possono essere combinati per generare diverse configurazioni di superficie, pur mantenendo una coerenza morfologica complessiva. Questo

approccio può essere interpretato come una forma di 'serialità flessibile', in cui la ripetizione modulare non coincide con la replica identica degli elementi, bensì con la variazione controllata delle caratteristiche fisiche di ciascuna unità.

Un tale espediente ridefinisce il significato di superficie, attribuendole qualità dinamiche non usuali nel campo del design di prodotto e del disegno architettonico, che risultano tanto più sostenibili ed efficaci quanto più riescono a corrispondere a esigenze mutevoli di riconfigurazione nel tempo e nello spazio della stessa superficie. La modularità consente infatti di sostituire o riconfigurare singoli componenti senza compromettere l'intero sistema, contribuendo a prolungare il ciclo di vita dei prodotti e a ridurre il consumo di risorse (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023).

Dal punto di vista percettivo l'analisi dei prototipi ha evidenziato come la variazione della profondità e dell'inclinazione delle superfici produca effetti differenti nella distribuzione delle ombre e nella percezione visiva delle texture (Fig. 12). Le configurazioni generate mostrano come piccole variazioni geometriche possano produrre effetti significativi anche sul comportamento acustico e ottico delle superfici, suggerendo la possibilità di utilizzare tali parametri come strumenti progettuali per modulare le qualità sensoriali dello spazio (Figg. 13, 14).

Limiti e implicazioni per il progetto | Nonostante i risultati evidenzino il potenziale della combinazione tra progettazione parametrica e manifattura additiva nello sviluppo di sistemi di superficie modulari, la ricerca presenta ancora dei limiti da considerare per una piena trasferibilità dei risultati. La sperimentazione è stata infatti condotta in un contesto prototipale, in cui i moduli sono stati realizzati con materiali e tecnologie di stampa 3D impiegate prevalentemente a fini di ricerca; sebbene tali tecnologie consentano di esplorare configurazioni formali complesse e sistemi modulari variabili, il passaggio alla scala industriale richiede ulteriori approfondimenti sui costi di produzione, sui tempi di fabbricazione e sulle prestazioni fisico-meccaniche dei materiali.

È inoltre da rilevare che il livello di maturazione ancora iniziale della ricerca condotta suggerisce l'opportunità di un'analisi metrologica (ad esempio ottica, acustica, illuminotecnica) degli effetti visivi e ambientali prodotti attraverso il controllo di parametri progettuali legati al design del singolo modulo, alla costruzione e alla ripetizione di geometrie di superficie, nonché alla trasformazione delle stesse superfici per effetto di processi di sostituzione modulare o di metamorfosi cronologica.

La letteratura evidenzia inoltre che la transizione dalla prototipazione alla produzione industriale

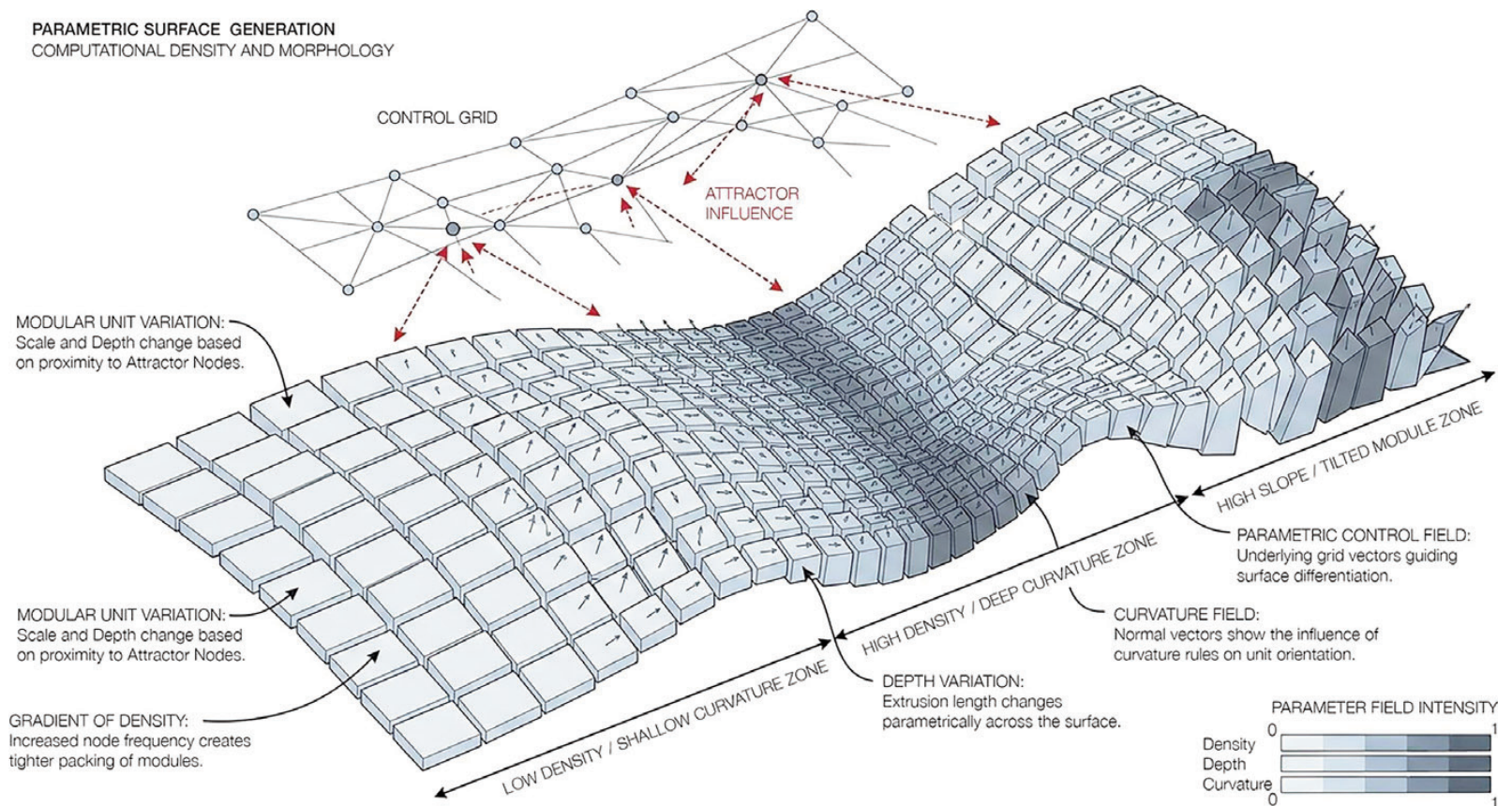


Fig. 4 | Example of a parametric surface generated using computational algorithms controlling density and morphological variations (credit: the Authors, 2026).

rappresenta una delle principali sfide per l'adozione diffusa della manifattura additiva. Sebbene la stampa 3D consenta di realizzare componenti ad alta complessità geometrica, la sua integrazione nelle filiere produttive richiede un ripensamento delle logiche progettuali e organizzative, in cui il design svolge un ruolo di mediazione tra ricerca tecnologica, produzione e innovazione.

Un ulteriore limite riguarda la valutazione degli impatti ambientali e sociali dei sistemi progettuali sviluppati: la modularità e la riconfigurabilità dei componenti possono contribuire a prolungare il ciclo di vita dei prodotti; tuttavia la misurazione dei benefici ambientali richiede protocolli di analisi più strutturati basati su metodologie di Life Cycle Assessment e su approcci integrati di valutazione degli impatti sulla biosfera (Sposito and De Giovanni, 2023). Accanto agli aspetti tecnologici emergono anche barriere di natura culturale e organizzativa che possono influenzare la diffusione di approcci progettuali basati sulla fabbricazione digitale. La transizione verso modelli produttivi più sostenibili richiede infatti il coinvolgimento di diversi attori lungo l'intera filiera industriale e può essere rallentata da fattori economici, normativi e organizzativi (Maffei et alii, 2024).

Nonostante queste criticità i risultati suggeriscono alcune direzioni di trasferibilità. Il sistema di superfici modulari basato sulla serialità variabile può essere applicato in diversi ambiti del progetto, tra cui il design degli interni, l'architettura e il design del prodotto. Allo stesso tempo l'approccio metodologico basato sull'integrazione tra progettazione parametrica e fabbricazione digitale può essere replicato in altri contesti di sperimentazione progettuale.

Nel complesso la ricerca evidenzia il potenziale del design come disciplina capace di connettere

innovazione tecnologica e sostenibilità nei processi di trasformazione dell'ambiente costruito (Fig. 15): questo obiettivo passa attraverso un approccio sperimentale, rapidamente orientato al confronto e al suo trasferimento nei settori della produzione materiale.

Relazione con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | La ricerca si inserisce nel quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile SDG delle Nazioni Unite, contribuendo in particolare agli SDG 9 (Industria, innovazione e infrastrutture), 11 (Città e comunità sostenibili) e 12 (Consumo e produzione responsabili). In relazione all'SDG 9 l'integrazione tra modellazione parametrica, manifattura additiva e design delle superfici evidenzia il potenziale delle tecnologie digitali come strumenti per l'innovazione dei processi progettuali e produttivi.

Per quanto riguarda l'SDG 11 il contributo propone una riflessione sul ruolo delle superfici come dispositivi attivi nella definizione della qualità percettiva degli spazi, con possibili ricadute sul benessere degli utenti e sulla qualità dell'ambiente costruito; in questo senso la ricerca suggerisce una prospettiva in cui le superfici non sono solo elementi di finitura, ma componenti capaci di incidere sulle dinamiche spaziali e relazionali. In relazione all'SDG 12 l'adozione di logiche modulari e di processi di fabbricazione additiva apre a scenari di maggiore efficienza nell'uso delle risorse, riduzione degli scarti e ottimizzazione dei processi produttivi. Tuttavia tali benefici dipendono strettamente dalle condizioni di applicazione, in particolare dalla scelta dei materiali, dai consumi energetici e dalla scala produttiva.

Accanto ai benefici diretti la ricerca sviluppa sinergie indirette con altri obiettivi, tra cui l'SDG 13 (Lotta al cambiamento climatico), in relazione al po-

tenziale di riduzione degli sprechi e all'ottimizzazione dei processi, e l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), in riferimento allo sviluppo di nuove competenze e filiere produttive legate alla fabbricazione digitale.

Al tempo stesso emergono possibili compromessi e criticità. In particolare l'adozione della manifattura additiva può comportare un aumento dei consumi energetici e dei costi di produzione, limitandone l'effettiva sostenibilità se non inserita in filiere ottimizzate; inoltre la complessità dei processi e delle competenze richieste può costituire una barriera alla diffusione su larga scala, incidendo sulla reale trasferibilità dei modelli proposti. In tale ottica il contributo evidenzia come l'efficacia delle strategie progettuali basate su superfici modulari e sulla fabbricazione digitale dipenda da condizioni di contesto specifiche, che includono l'accesso alle tecnologie, l'organizzazione della filiera produttiva e l'integrazione tra progettazione, produzione e gestione del ciclo di vita.

Conclusioni | Uno dei principali contributi della ricerca consiste nella proposta di un approccio progettuale basato sulla serialità variabile, in cui la modularità non coincide con la ripetizione identica dei componenti, bensì con la variazione controllata di parametri morfologici condivisi. Tale impostazione consente di generare configurazioni diverse a partire da un numero limitato di elementi modulari, ampliando le possibilità espressive e funzionali del progetto. In questo senso la manifattura additiva si configura come uno strumento progettuale capace di supportare lo sviluppo di sistemi complessi nei quali progettazione e produzione risultano strettamente integrate (Thompson et alii, 2016). Dal punto di vista teorico il contributo si inserisce nel dibattito

Design for Additive Manufacturing (DfAM)

As integration of additive manufacturing constraints and opportunities in early phases of design process

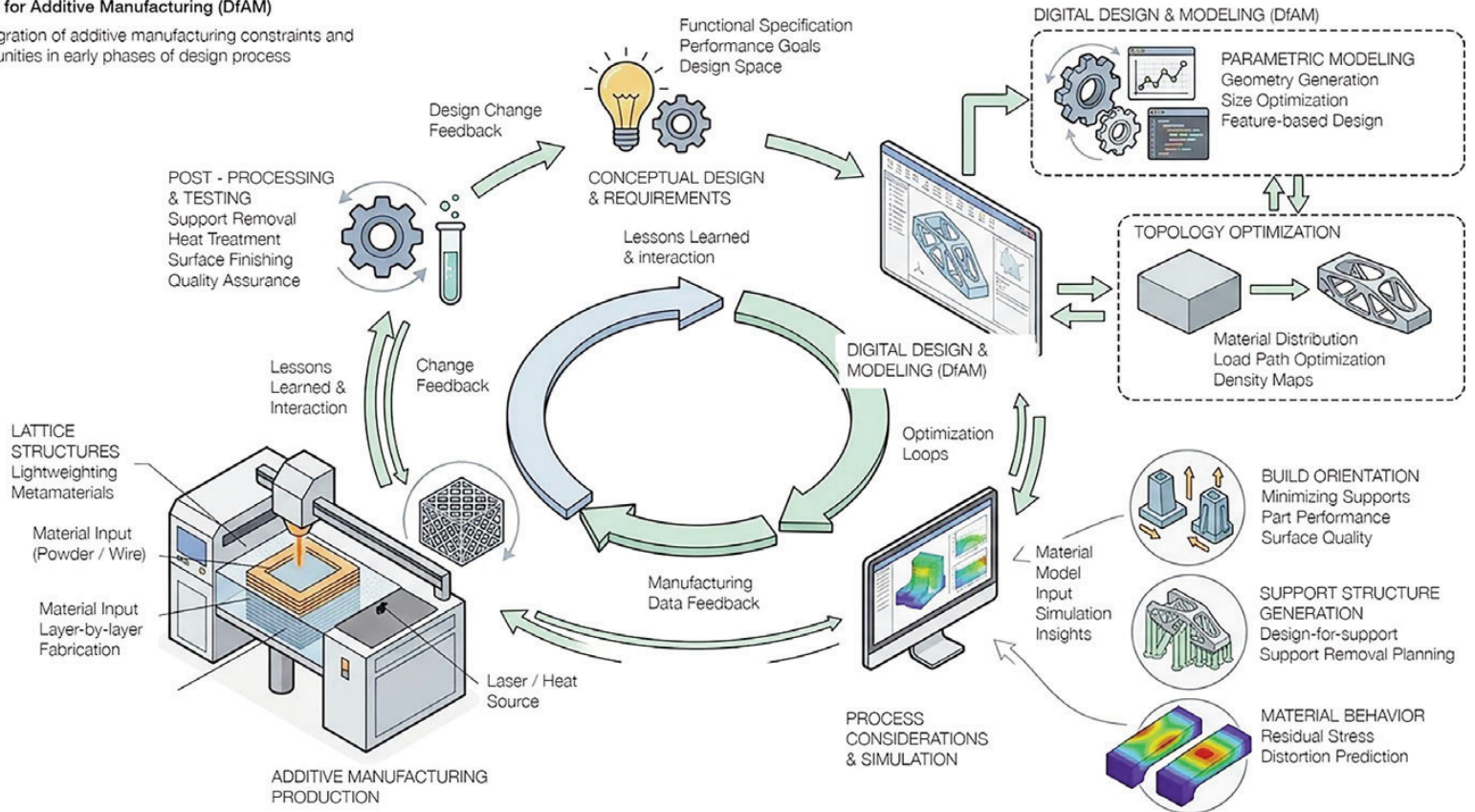


Fig. 5 | Conceptual diagram of Design for Additive Manufacturing, which integrates additive design and manufacturing early in the design process (credit: the Authors, 2026).

internazionale sulla trasformazione dei processi progettuali nell'era della fabbricazione digitale. La cosiddetta seconda svolta digitale ha ridefinito il rapporto tra progetto e produzione, rendendo possibile lo sviluppo di sistemi caratterizzati da elevata complessità morfologica e da continuità tra la modellazione computazionale e la materializzazione dell'artefatto. In questo scenario il design assume un ruolo sempre più rilevante come disciplina capace di mediare tra innovazione tecnologica, processi produttivi e le dimensioni culturali del progetto.

Un ulteriore contributo riguarda la possibilità di interpretare i sistemi di superficie modulari come dispositivi progettuali coerenti con i principi dell'economia circolare. La modularità e la riconfigurabilità dei componenti possono contribuire a prolungare il ciclo di vita dei sistemi progettuali e a facilitare le operazioni di manutenzione, sostituzione e riuso, favorendo la riduzione del consumo di risorse e lo sviluppo di modelli produttivi più sostenibili.

Alla luce di queste considerazioni il contributo si colloca in relazione agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030, in particolare rispetto all'Obiettivo 9, che promuove industrie resilienti, infrastrutture sostenibili e sistemi di innovazione. L'integrazione tra progettazione digitale, fabbricazione additiva e strategie di modularità può contribuire allo sviluppo di modelli produttivi più flessibili e adattivi, generando sinergie anche con l'Obiettivo 12, relativo alla produzione e al consumo responsabili, e con l'Obiettivo 11 dedicato alle città e comunità sostenibili.

Nonostante i risultati ottenuti la ricerca apre ulteriori prospettive di sviluppo. Sarà necessario sviluppare protocolli di valutazione più sistematici per analizzare gli impatti ambientali e sociali dei siste-

mi progettuali sviluppati, integrando metodologie di analisi del ciclo di vita e strumenti di valutazione delle prestazioni ambientali. Allo stesso tempo sarà opportuno indagare le condizioni che possono favorire il trasferimento dei risultati dalla scala sperimentale a quella industriale. Nel complesso la ricerca evidenzia il potenziale delle superfici progettuali come campo di sperimentazione nel quale il design può contribuire allo sviluppo di strategie innovative sostenibili. Interpretate come sistemi progettuali complessi, le superfici possono diventare infrastrutture materiali capaci di integrare ricerca tecnologica, qualità percettive e responsabilità ambientale nello sviluppo di nuovi modelli progettuali per l'ambiente costruito.

Alla luce dei risultati emersi, la ricerca evidenzia alcune criticità che meritano approfondimento. In primo luogo si rileva uno scarto significativo tra la sperimentazione prototipale e le possibilità di trasferimento su scala industriale: se da un lato la manifattura additiva consente elevati livelli di controllo geometrico e di variabilità, dall'altro presenta ancora limiti legati ai tempi di produzione, ai costi e all'integrazione nelle filiere produttive consolidate. In secondo luogo emerge una tensione tra qualità percettive e prestazioni effettive: le superfici sviluppate mostrano un elevato potenziale nella modulazione della luce, nella variazione cromatica e nella costruzione della profondità visiva; tali qualità risultano tuttavia prevalentemente valutate in termini qualitativi e necessitano di ulteriori verifiche mediante metriche quantitative e strumenti di misurazione più avanzati.

Un ulteriore elemento critico riguarda il ruolo della modularità: sebbene essa rappresenti una strategia efficace per gestire la complessità e favorire la replicabilità dei sistemi, non garantisce au-

tomaticamente benefici in termini di sostenibilità, che dipendono invece da variabili quali i materiali, i processi produttivi e il ciclo di vita del prodotto.

In questo quadro il contributo propone una rilettura della superficie come infrastruttura progettuale intesa non come semplice esito formale, ma come dispositivo capace di integrare la generazione geometrica, il comportamento materiale e la dimensione percettiva. Tale interpretazione apre a possibili sviluppi futuri orientati all'integrazione tra modellazione parametrica, fabbricazione digitale e valutazione prestazionale, con l'obiettivo di superare la separazione ancora esistente tra le dimensioni tecnologica ed esperienziale del progetto.

In the contemporary context marked by an increasingly complex environmental, social and economic polycrisis, design is called upon to rethink production models, material infrastructures and innovation processes that characterise the built environment. The United Nations 2030 Agenda (UN, 2015) identifies Sustainable Development Goal 9 (Fig. 1) as a strategic axis for promoting resilient industries, sustainable infrastructure, and innovation systems that integrate economic development, environmental sustainability and social progress. The scientific debate points out that such transformations require systemic design approaches capable of connecting technology, production and environmental responsibility (Fig. 2).

It is against this backdrop that the evolution towards Industry 5.0 is taking place. Indeed, the transition from the Industry 4.0 paradigm to Industry 5.0 is characterised by substantial technological, organisational, and value integration, redefining the

Stage	Description	Tools	Controlled parameters	Outcome	Evaluation criteria
Design brief	Definition of basic geometries and surface patterns	Parametric modelling software (Blender and Grasshopper)	Module dimensions; pattern density; depth; surface inclination	3D digital models	Geometric consistency; morphological variability
Digital modelling	Generation of variants through parametric control	CAD software and algorithmic modelling	Number of iterations; parameter variation (density, angle, scale)	Series of digital configurations	Formal diversification; pattern legibility
Pre-processing	Converting models into files for manufacturing	Slicing software	Layer height; infill; print speed; extrusion temperature	Machine file (G-code)	File validity; manufacturability
Manufacturing	Fabrication of modules using 3D printing	FDM printer	Material (PLA); nozzle; speed; temperature	Physical prototypes	Surface quality; geometric accuracy
Perceptual tests	Analysis of light-surface interactions	Controlled lighting system	Light angle; intensity; colour temperature	Visual and perceptual variations	Shadow contrast; colour variation; perceived depth
Analysis of results	Comparison of configurations	Direct observation and photographic documentation	Constant observation conditions	Mapping of perceptual performance	Consistency between parameters and effects; repeatability

Tab. 2 | Methodological protocol for the experimental process (credit: the Authors, 2026).

role of manufacturing within socio-economic systems. If Industry 4.0 favoured vertical and horizontal integration of cyber-physical systems, IoT interconnection, and big data analysis to maximise efficiency and productivity, Industry 5.0 expands this architecture, leading to systemic integration oriented towards environmental sustainability, supply-chain resilience, and human centrality. Advanced digital technologies – including digital manufacturing – are no longer solely aimed at optimising operational performance, but are integrated with objectives of reduced environmental impact, adaptive flexibility and mass customisation.

Within this framework, additive manufacturing represents a key enabler, as it integrates generative design, distributed production and efficient use of resources, fostering circular and decentralised production models. Human-machine integration also takes on a qualitative dimension, enhancing the skills, creativity and well-being of workers, in a logic of co-creation of value that sometimes also involves the user base, enabling new modes of consumption and fruition. Design assumes a mediating role between technological research, production and society, contributing to the definition of development models in which materials, production processes and perceptual dimensions of design are considered in an integrated manner (European Commission, 2021; Maddikunta et alii, 2022). Within this framework, surfaces are progressively assuming a central role in contemporary design. Traditionally considered as finishing elements, they are now reinterpreted as active devices capable of mediating between matter, perception and environmental performance. Indeed, surface design contributes to the construction of the sensorial qualities of space, transforming the covering into a design system that integrates aesthetic, technical and communicative dimensions (Carullo and Pagliarulo, 2013; Sully, 2024). In this perspective, matter becomes a design agent capable of generating relationships between technology, perception and environment (Antonelli and Burckhardt, 2020).

Similarly, the spread of digital fabrication and additive manufacturing technologies is redefining the relationship between design and production. 3D printing allows the production of complex ge-

ometries while maintaining a strong continuity between digital model and physical artefact (Fig. 3), introducing new relational threads between design and production, where geometric complexity becomes a controllable variable and no longer an operational limitation (Gibson et alii, 2021; Thompson et alii, 2016). Several studies also highlight the growing role of additive manufacturing in industrial innovation processes and product customisation strategies, e.g. through customised design and mass customisation (Srivastava and Rathee, 2022).

These transformations are located within the so-called ‘second digital turn’, in which design is not limited to the formal definition of objects, but extends to the configuration of the processes that determine their production and materialisation. In this scenario, computational design and digital fabrication become complementary tools for developing design systems characterised by high morphological complexity and formal variability.

Despite the growing interest in these technologies, the scientific debate still tends to address additive manufacturing research and surface design studies separately. Thus, an integrated perspective that interprets the surface as a design system connecting production processes, morphological configuration, and perceptual experience remains underexplored. However, some studies suggest that surfaces can be interpreted as complex devices in which technological, environmental and cultural dimensions converge (Gasparini, 2023).

In light of these premises, the contribution proposes a reinterpretation of design surfaces as infrastructures of innovation capable of integrating design research, technological experimentation and sustainability. The paper presents the results of an experimental research project aimed at developing surface modules generated through parametric modelling and realised using additive manufacturing technologies. The aim is to investigate how modular design and 3D printing can contribute to the definition of variable, flexible surface systems that respond effectively to changing environmental conditions and customisable user requirements. The contribution is part of the international debate on the role of design in sustainable innovation processes and proposes a replicable methodological approach that integrates digital

design, prototyping, and the critical observation of results.

State of the Art: designing surfaces, additive manufacturing, and modularity

In recent years, contemporary design has progressively redefined the role of surfaces in the built environment, overcoming the traditional view that treated them as mere finishing elements. The literature highlights how the surface can be understood as a device capable of integrating technological, environmental, and perceptual dimensions, contributing to the construction of the sensorial qualities of architectural space and industrial products (Sully, 2024).

To strengthen the theoretical framework and verify the research’s positioning in the international debate, a number of recent case studies were selected that address the theme of the surface in relation to additive manufacturing, modularity, and perceptual performance. The selection was carried out according to the following criteria: a) use of digital or additive manufacturing technologies; b) presence of a modular or parametric surface system; c) integration between geometric configuration, material behaviour and perceptual qualities; d) relevance in the contemporary research or design practice landscape (Tab. 1).

This interpretation is reflected in the case studies analysed, in which the surface does not merely mediate relationships but contributes directly to the definition of the system’s performance. In particular, while the MX3D Bridge represents an example of the application of additive manufacturing mainly oriented to the structural scale, the cases of the BUGA Fibre Pavilion and sand-printed facades show a greater integration between geometry, material behaviour and perceptual qualities (Dillenburger et alii, 2018). However, a common critical issue arises regarding the transferability of the developed systems, which is often limited by high costs, complex processes, or difficulties in integrating them into traditional production chains. In this framework, modularity emerges as a key element to make such approaches more scalable, allowing mediation between design variability and constructional feasibility. In this perspective, the surface is configured as an interface between matter, the environment, and perception, assuming

an active role in spatial experience. In design and architecture, wrapping and covering represent today the point of convergence of a twofold field of interest: the first concerns the activation of the surface to enable new forms of interaction, while the second concerns its communicative dimension in visual experience. In both cases, the surface assumes a mediating role, in which technological, synaesthetic and cultural aspects coexist within the project (Dal Buono and Scodeller, 2016).

These reflections are complemented by recent studies that highlight how the perceptual properties of materials – in particular, texture, apparent naturalness, and surface configuration – significantly influence the perceived quality of interiors and users' responses. In particular, experimental research shows that surfaces characterised by greater material articulation and geometric complexity produce measurable perceptual changes in terms of visual comfort and aesthetic evaluation (Zhang, Song and Luo, 2023; Weninger et alii, 2024); such contributions reinforce the interpretation of the surface as an active device in the construction of spatial experience. In this perspective, the project can be interpreted as a device of mediation between heterogeneous variables, capable of organising complex relationships between material, technological and perceptual parameters, according to non-linear logics (Mascitti and Paciotti, 2024).

A significant part of contemporary research investigates the relationship between material design and technological innovation. The concept of 'material-driven design' has redefined the integration of materials into the design process, highlighting how the sensory and performative properties of matter can guide the development of design solutions (Karana et alii, 2015): interdisciplinary approaches such as the 'ecology of materials' (Oxman et alii, 2015) have expanded the reflection on the role of materials by integrating biological, technological and environmental dimensions into design systems. This evolution is closely linked to the development of digital technologies for design and fabrication.

In this perspective, computational modelling and parametric systems assume a central role in controlling geometric complexity and managing design variability. Recent studies highlight how the use of implicit and algorithmic models enables greater consistency between the design and additive manufacturing phases, enabling the generation of complex surfaces directly compatible with

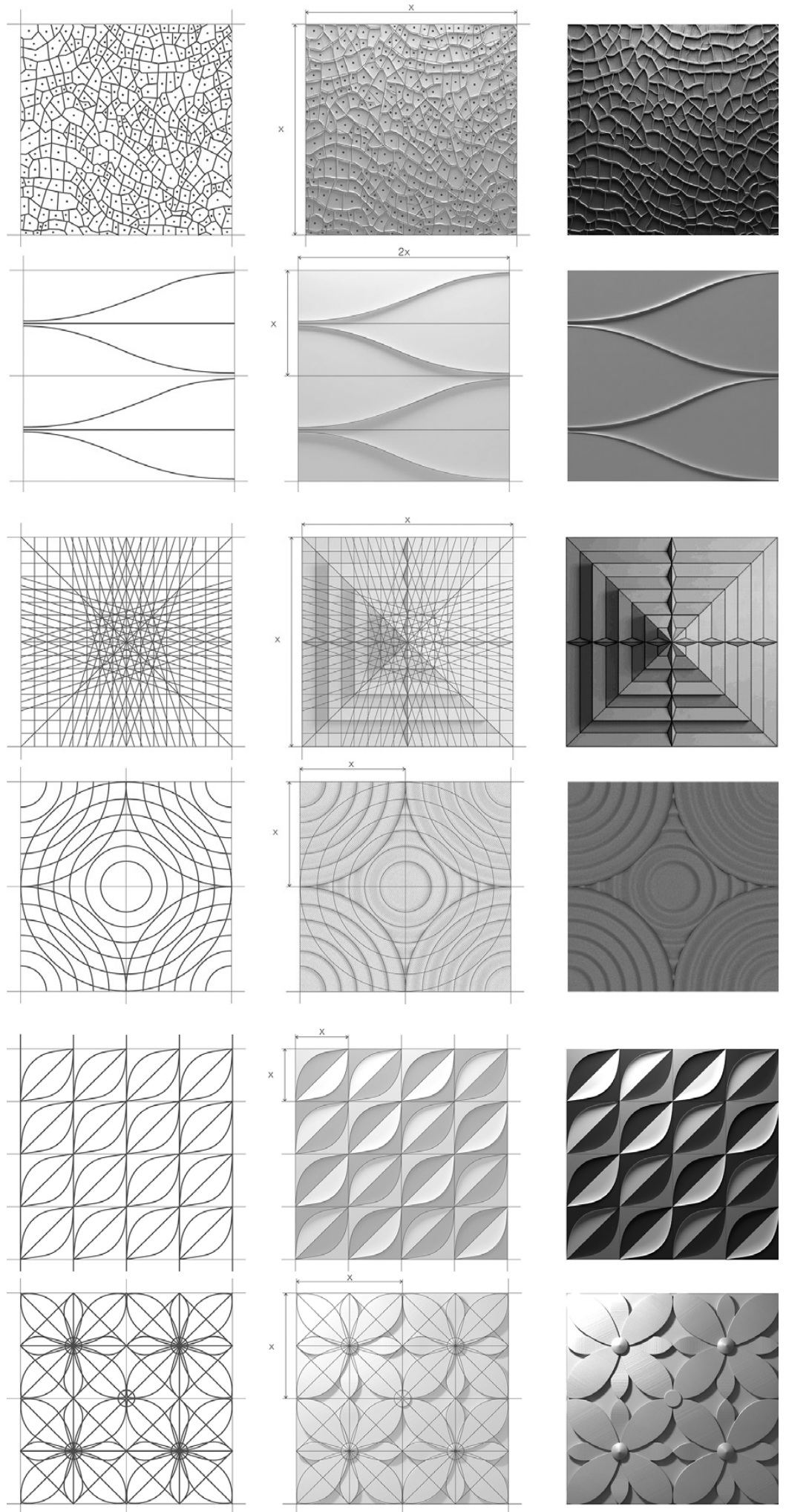


Fig. 6-8 | Graphic development from two-dimensional geometric drawing to three-dimensional modelling in relation to digital manufacturing (credit: the Authors, 2026).

Case	Modularity	Manufacturing	Verified performance	Perceptual quality	Reproducibility / Transferability	Relevance to the present paper
3D-printed micro-perforated panels (2024)	High (variation in sub-volumes / cavities)	3D printing of micro-perforated panels	Sound absorption, numerical simulation, and impedance-tube testing	Secondary to acoustic performance	Good for acoustic applications, but dependent on instrumental testing	Shows how parametric variability can be linked to measurable performance metrics – a step only partially addressed in the present study
Adjustable acoustic metamaterial cell (2024)	Medium (repeatable unit with adjustable behaviour)	SLA 3D printing using functional magnetic resin	Adjustable resonance, vibrometry, and material characterisation	Limited (functional efficiency takes precedence)	Suitable as a proof of concept, but more complex in terms of materials and processes	It highlights a further distinction: not only geometric variation, but also post-manufacturing adaptability; the proposed method is more accessible but less responsive
3D-printed biomimetic tribological surfaces (2024)	High (a family of bio-inspired patterns)	FDM with PLA	Anisotropic friction and wear	Significant (texture and performance are closely interrelated)	Suitable for grip / interface applications	This is the closest comparison in terms of modulated texture; it suggests extending your protocol to include haptic and tribological tests
Weather-responsive hygromorphic 4D-printed shading (2024)	High (customised serial components)	FFF / 4D printing using cellulose bilayers	Temperature / humidity response, annual monitoring, and full-scale façade testing	Significant (morphological transformation also produces visual effects)	Very high, but with greater complexity in development and validation	This points to a possible development direction: from a perceptual modular prototype towards a scalable, adaptive shell tested in real-world use

Tab. 3 | Comparative summary of methodological and performance benchmarks (credit: the Authors, 2026).

manufacturing processes (Li et alii, 2018). This helps to overcome the traditional separation between form and process, integrating constructional and performance logics from the earliest design stages.

Parametric modelling tools make it possible to generate complex morphological systems with controlled variations in geometry and density, favouring the creation of surfaces capable of producing differentiated spatial effects: in this context, the so-called ‘second digital turn’ has redefined the relationship between design and production, extending the role of design to the configuration of the materialisation processes of the artefact (Carpo, 2017).

At the same time, the spread of additive manufacturing has introduced significant transformations in production processes, enabling the production of complex geometries that are difficult to achieve with traditional industrial methods. Indeed, 3D printing enables the production of components with high morphological complexity (Fig. 4) while maintaining continuity between the digital model and the physical artefact (Gibson et alii, 2021). Several studies also highlight the growing role of additive manufacturing in industrial innovation processes and product customisation strategies (Srivastava and Rathee, 2022; Bolzan, 2020).

Further contributions highlight how additive manufacturing is progressively evolving from a prototyping technology to an advanced manufacturing system, capable of affecting product development models, customisation and geometric complexity management. In particular, systematic reviews on the topic emphasise how 3D printing allows the integration of form, function and performance in a single process, opening up new possibilities for the design of articulated and performative surfaces (Ngo et alii, 2018). At the same time, critical issues related to cost, production time, and industrial scalability emerge, necessitating an integrated assessment between formal potential and production conditions (Yang and Zhao, 2015).

In the field of architecture and design, these transformations have favoured research oriented towards experimenting with modular components and systems. In this perspective, modularity can-

not be interpreted exclusively as a principle of seriality, but as a strategy for managing the complexity and adaptability of envelope systems, capable of integrating variability, performance and design control (Manni and Valzano, 2023). In this context, recent research shows that integrating parametric design, digital fabrication, and modular construction enables the transfer of design variability into buildable, assemblable systems even at the architectural scale. Studies show that the combination of modular components and additive processes enables the realisation of complex structures while maintaining high levels of geometric control and adaptability (Su et alii, 2023). In parallel, the use of materials as design tools highlights the possibility of integrating performance, sustainability and expressiveness within a single system, reinforcing the role of design in managing complexity (Dahy, 2023). Other studies have explored the use of 3D printing for the realisation of architectural elements with integrated performance (Dobrovski, Verlinden and Geraedts, 2012), while still others have investigated programmable materials and adaptive building systems (Correa et alii, 2023; Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). There is also no shortage of recent studies highlighting the role of digital fabrication in integrating technological innovation and sustainability into architectural processes (Dahy, 2023).

The relationship between modularity and sustainability thus rightfully enters the debate on the transition towards circular economy models: modular design is considered a strategy capable of increasing the durability of products and facilitating maintenance, repair and remanufacturing (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023), contributing to the reduction of resource consumption (EMF, 2021) and to the development of non-linear, iterative consumption and management practices.

In this direction, research on responsive architecture highlights how system intelligence can be incorporated directly into matter and geometric configuration, reducing dependence on active technological systems and favouring passive, low-energy strategies (Holstov, Bridgens and Farmer, 2017), while studies on the use of additive manufacturing show how the effectiveness of such tech-

nologies depends on their integration within coherent production, decision-making and design systems, in which modularity, materials and environmental objectives are considered within an integrated perspective (Raffaelli et alii, 2021). Alongside technological issues, the complexity of contemporary design systems emerges, characterised by interactions between technical, environmental and social factors that require interdisciplinary approaches (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024): in this context, design can be interpreted as a mediating practice between actors, technologies and production processes (Celaschi, Casoni and Formia, 2024), while studies on circular transition highlight the involvement of different actors along the industrial supply chain (Maffei et alii, 2024). Despite the increasing popularity of research on digital fabrication and surface design, the literature shows little systematic integration across studies on surfaces, modularity, and additive manufacturing. In particular, while the literature on additive manufacturing emphasises the opportunities related to geometric freedom and customisation, and studies on perception highlight the importance of material and surface qualities in defining spatial experience, there remains a lack of fully integrated thinking that links these areas within a single methodological framework.

This mismatch highlights the need to consider the surface as design infrastructure, capable of connecting digital processes, modular organisation, and perceptual behaviour (Scala, 2023).

Methodology and research phases | The research falls within the field of ‘design research’ applied to material and technological experimentation and adopts an iterative methodological approach that integrates parametric design, digital fabrication and critical observation of prototypes. The approach is based on the ‘research-through-design’ paradigm, in which knowledge emerges through the design process and the production of experimental artefacts capable of verifying relationships between form, material, and perceptual performance (Frayling, 1994; Zimmerman, Stolterman and Forlizzi, 2010). In this framework, design becomes an investigation tool based on succes-

sive cycles of design, prototyping and validation, aimed at producing a open, replicable production model that can be updated and refined.

The methodological objective is to explore the potential of additive manufacturing in the design of modular surface systems characterised by controlled variations in geometry and depth. The hypothesis assumes that the combination of parametric design and 3D printing can favour variable seriality systems, in which modularity does not coincide with the identical repetition of elements, but rather with the controlled variation of design parameters. This approach is consistent with Design for Additive Manufacturing approaches (Fig. 5), which propose integrating additive manufacturing logic from the earliest design stages (Thompson et alii, 2016).

The research protocol was articulated as a sequence of steps linking digital design, physical prototyping, and result analysis. The first phase involved defining a parametric system for generating surface modules with controlled morphological variations. Starting from a basic geometric matrix, design parameters were identified that could influence module configuration, including relief depth, texture density, and surface inclination. The manipulation of these parameters made it possible to generate a family of modules that are different yet attributable to the same generative logic, whose combinatorial association allows the entire surface, understood as an ensemble, to acquire its own physical and semantic value.

The second phase involved materialising the digital models using additive manufacturing technologies. The modules were produced by 3D printing using FDM (Fused Deposition Modelling), a technology that deposits layers of thermoplastic material from 3D models. The prototypes were made from PLA, with thicknesses ranging from 0.1 to 0.2 mm and infill values of 15% to 30%, depending on the modules' morphological characteristics. The choice of this technology is linked to its widespread use in design prototyping and to its ability to produce complex components, as also highlighted in the literature on the role of 3D printing in the development of flexible production models (Bollzan, 2020).

Once the prototypes had been realised, the third phase aimed to study the aggregate configurations of the modules and the perceptual implications for users and exhibition environments. The observation was conducted by simulating different lighting conditions and comparing the configurations obtained by combining the modules. The focus was on the relationship between surface morphology, shadow behaviour and visual perception of textures, in continuity with studies investigating the role of matter in the construction of the sensory experience of space (Karana et alii, 2015).

The final phase involved systematising the results and defining a repertoire of modular assemblages, each composed of the developed modules. This repertoire represents an open system of design possibilities and demonstrates how vari-

able seriality can generate differentiated surfaces from a limited number of components. The research, therefore, proposes a replicable methodological approach that integrates parametric design and additive manufacturing as tools for surface design experimentation. To ensure the replicability of the experimental process, a summary of the methodological protocol adopted is provided, broken down into inputs, tools, parameters, outcomes and evaluation criteria (Tab. 2).

To strengthen the methodological positioning of the research, the developed protocol was compared with several recent international cases on additive performative surface systems, parametric-functional configurations, and adaptive envelopes. The cases were selected not so much for formal affinity as for the comparability of the experimental device: in all of them, an operational chain is recognisable that links the parametric definition of the geometry, materialisation through additive processes and the verification of a measurable performance. In this sense, the comparison clarifies the strengths, limitations, and transferability of this contribution.

A first group of precedents concerns additive surfaces with high acoustic performance. In the study of 3D-printed micro-perforated panels with multiple cavities, the systematic variation of geometrical parameters such as pore diameter, perforation ratio, thickness and depth of back cavity was verified through numerical simulation and technical testing in an impedance tube, showing that the

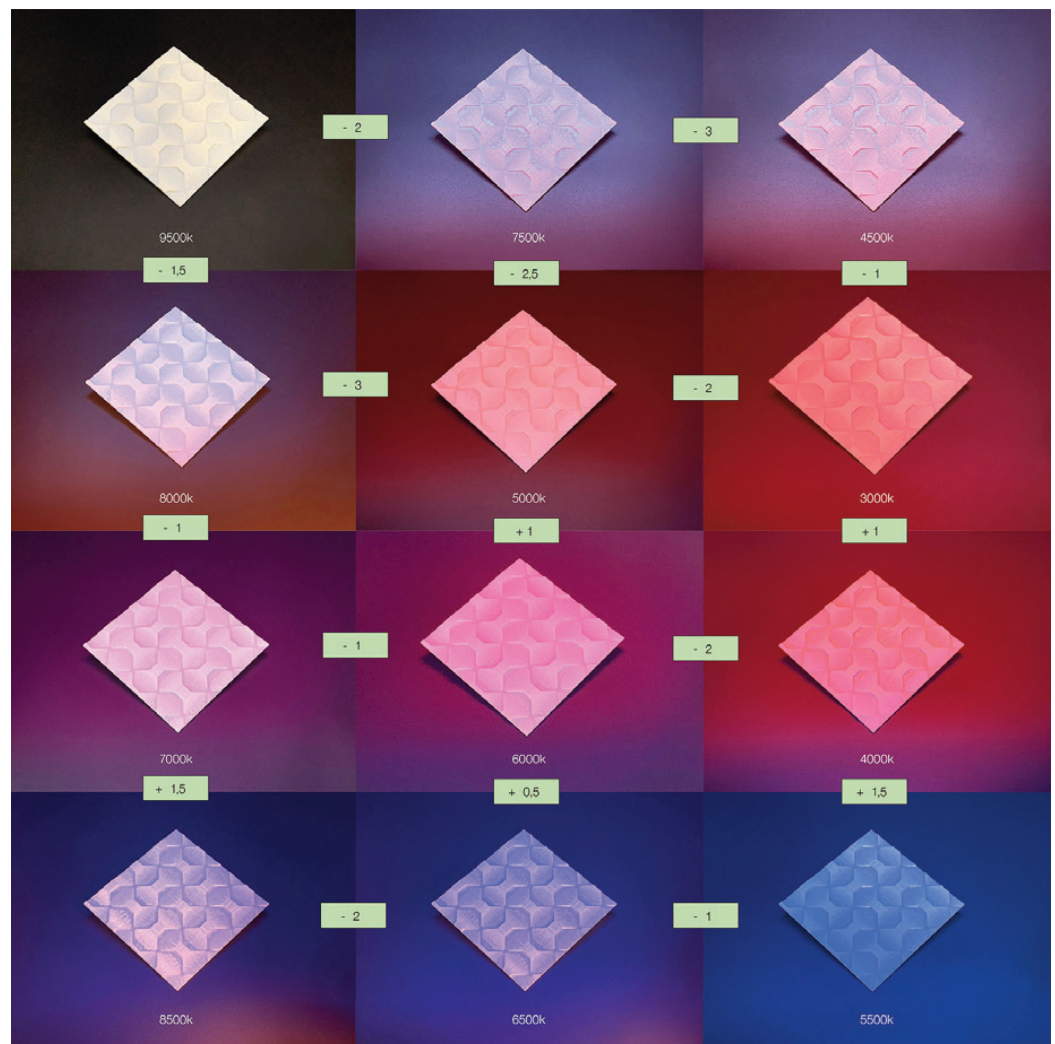


Fig. 9 | Results of the variation of light incidence versus Kelvin degrees in relation to surface texture (credit: the Authors, 2026).

parametric differentiation of the modules can produce a broader bandwidth and more controlled absorption than in uniform systems (Deepak et alii, 2024).

Here, the most methodologically relevant element is that variability is not treated as a mere aesthetic outcome, but as a performance device that can be verified through predominantly quantitative observation. At the same time, this reference highlights an initial difference in development and a limitation of the research presented here: while the protocol adopted accurately analyses the perceptual effects of light, shadow and texture through an empirical and predominantly qualitative experimental approach, it does not yet integrate a phase of instrumental measurement of the functional performance of the surface. It follows that the paper's contribution is, at present, more solid on the morphological-perceptual level than on the metrological-performance level, and that the research requires further development oriented towards the collection of analytical data through instrumental observation.

A second reference is research on fully adjustable, 3D-printed acoustic metamaterials, such as the SLA resonant cell with magnetic membrane, which can change the resonance frequency after fabrication (Gardiner et alii, 2024). Here, the point of interest is not only the printing of a complex ge-

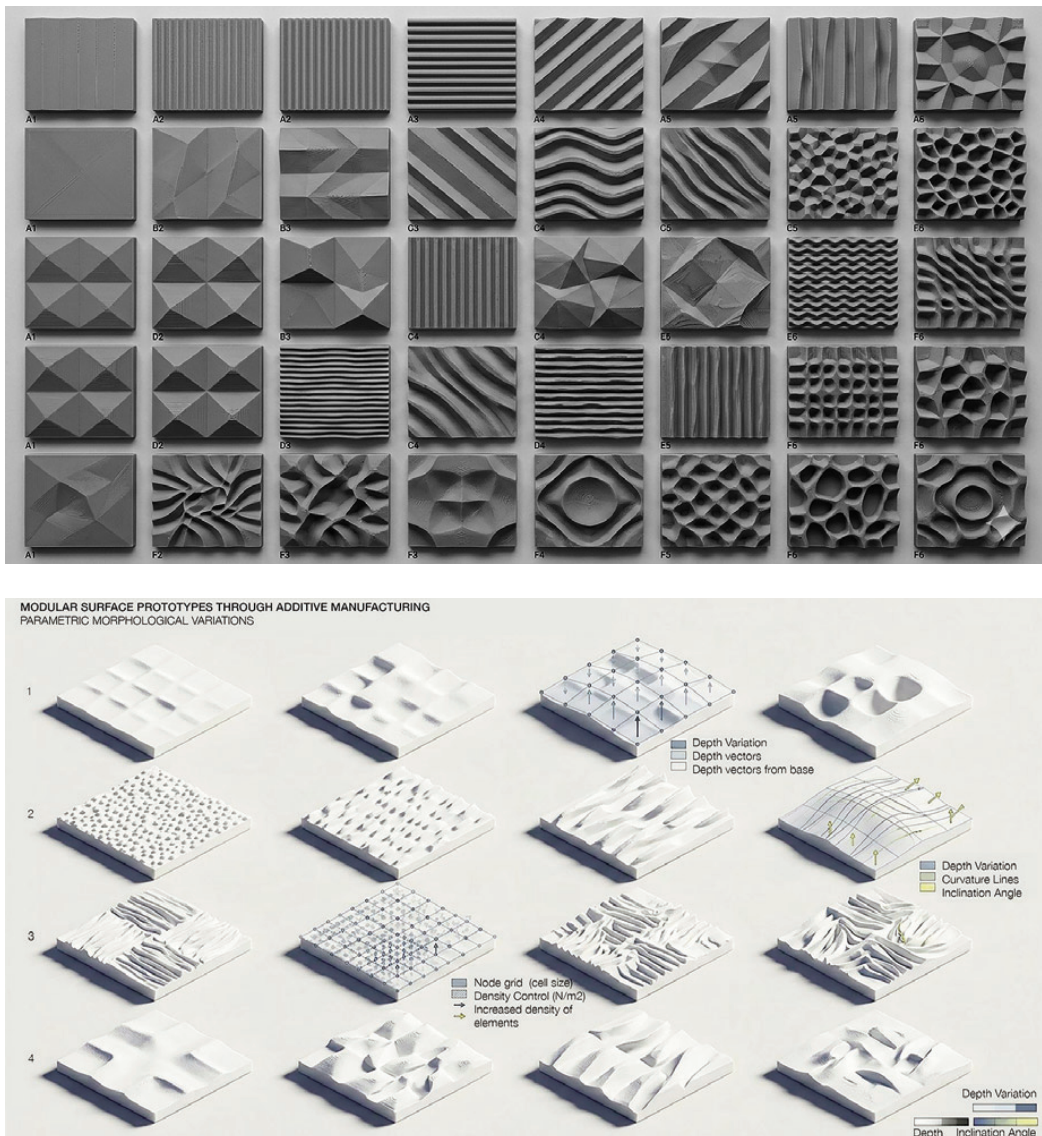
ometry, but the integration of additive manufacturing, the functionalised material and the adaptive behaviour of the component. With respect to this line of research, the contribution proposed here shares the idea of an open generative geometry and non-standardised production, but differs from it in that it works on a 'weak' adaptivity, relying on module recombination and contextual perceptual effects, not on an active or post-fabrication transformation of the component (Figg. 6-8). The comparison thus makes explicit that the method's transferability is high for static or semi-variable modular surfaces, whereas it remains limited for truly responsive or reconfigurable systems in operation.

A third field of comparison concerns biomimetic surfaces oriented towards grip and tribological response. A recent study on bioinspired PLA textures 3D-printed with FDM (Fused Deposition Modelling) technology investigated five textures derived from natural models and verified their behaviour in terms of anisotropic friction and wear through mutual sliding tests. In this case, as in the present research, the surface is understood as an active interface between geometry and behaviour, but the experimental procedure shifts from a predominantly visual-perceptual observation to a quantitative characterisation of the mechanical interaction (comparable to the first case study cited above). The parallelism is particularly useful because it still

shows a possible methodological extension of the protocol adopted here: the parameters used today to modulate relief depth, texture density and surface inclination could also be related, in subsequent studies, to coefficients of friction, haptic comfort or wear resistance, expanding the transferability of the system to applications where tactile or grip performance is central (Mzali et alii, 2024). A fourth point of comparison is offered by the most recent studies on 4D-printed adaptive envelopes, in particular the bio-based hygromorphic shading system developed for a real façade, in which two-layer cellulosic structures made using FFF (Fused Filament Fabrication) technology were tested in the laboratory, monitored for over a year under real weather conditions and then brought to architectural scale. This case is particularly relevant because it demonstrates a methodological advancement in laboratory prototyping: the design-fabrication-test cycle does not stop at sample verification, but also includes robustness tests, weathering behaviour verification, transfer to architectural scale, and on-site demonstration.

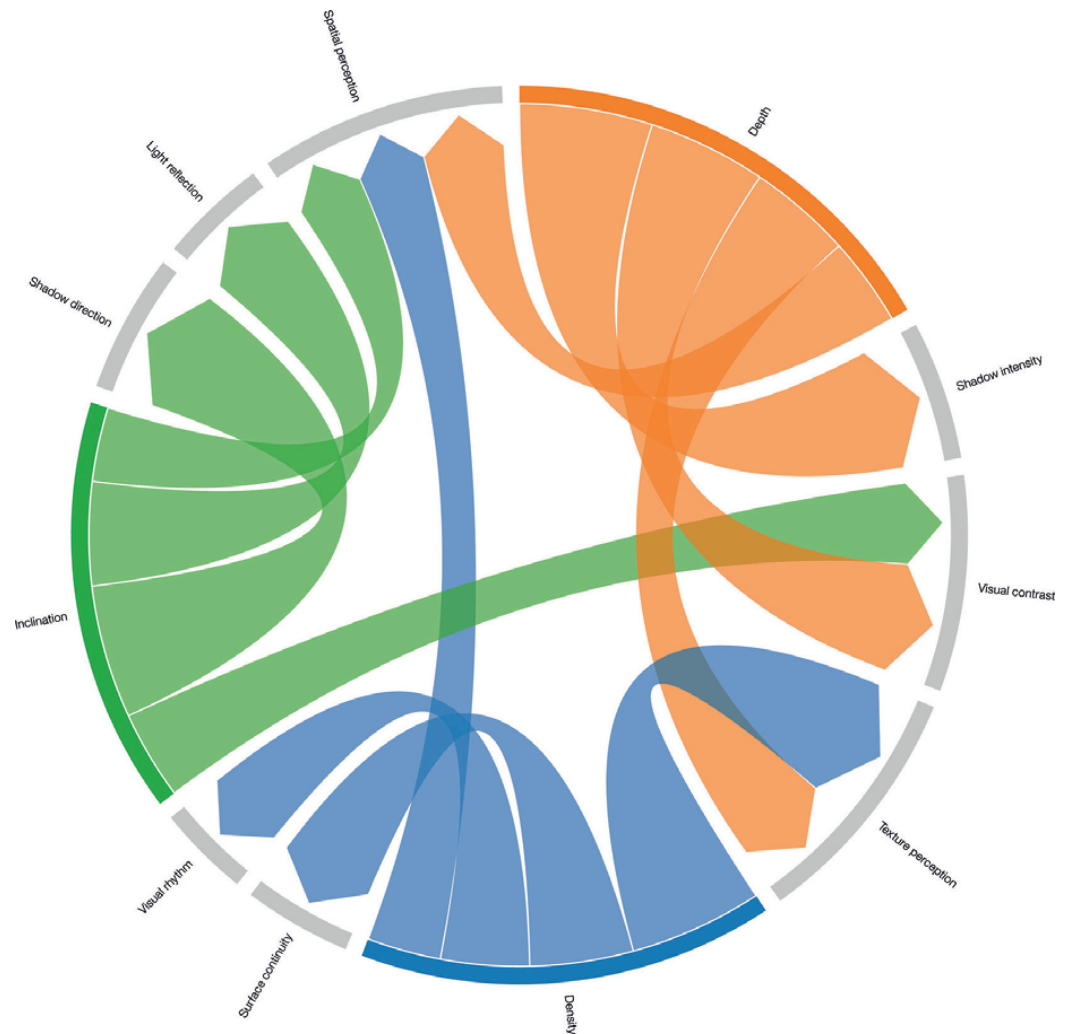
Compared with this case study, the research presented here is distinguished by the construction of an open repertoire of assemblies and the definition of a replicable modular grammar. However, validation of the results is still mainly at the prototypical and perceptual-environmental levels. The comparison, therefore, points to the extension of the protocol to durability tests, tests under conditions of use and application-scale tests as a necessary further development to strengthen its scientific contribution.

Taken together, these precedents make it possible to better specify the specific contribution of this research, the strength of which lies not in introducing a new technical performance in the strict sense, but rather in proposing a replicable method for constructing modular surfaces with variable seriality, in which additive manufacturing is assumed to be the condition that makes the controlled articulation of difference possible. Compared to the most advanced performance cases, the study offers greater technological accessibility – thanks to the use of FDM and PLA, processes widely used in design prototyping – and a more immediate transferability to the fields of interior design, outfitting, and perceptual surface qualification devices. On the other hand, its replicability is nowadays mainly procedural and geometric, while full transferability



Figg. 10, 11 | Prototypes of modular surfaces made by 3D printing and used for design experimentation. Starting with a basic geometric matrix, the modules were developed through controlled parametric variations of depth, slope and texture density. The combination of these parameters generates morphological configurations capable of producing different visual and perceptual effects under different lighting conditions and observer positions (credits: the Authors, 2026).

Fig. 12 | Diagram of the relationships between surface geometrical parameters (depth, density, and slope) and the perceptual effects generated, highlighting the role of morphological variations in modulating the visual perception of surfaces (credit: the Authors, 2026).



to high-performance fields requires the integration of quantitative metrics, standardised test protocols, and verification at the scale of use (Tab. 3).

Comparison with recent cases confirms that the present research aligns with studies that use additive manufacturing not only to produce formal complexity, but also to build verifiable relationships between geometric parameters, surface behaviour, and quality of experience. Within this framework, the specific contribution of the work is to define a replicable protocol for modular surfaces with variable seriality, with further evolution potentially including the integration of quantitative performance metrics and validation at the application scale.

Experimental results | To verify the relationship between morphological configurations and perceptual effects, specific evaluation criteria were defined and systematically applied to the developed prototypes. The metrics adopted, mainly qualitative but structured around controlled parameters, enable comparison of different configurations with respect to the perceptual performance resulting from the interaction between light and surface.

The main evaluation metrics are as follows: a) light-shadow contrast – ability of the surface to generate perceptual differences between illuminated and shaded areas, in relation to the depth and inclination of the surface articulation; b) perceived colour variation – change in colour perception as a function of surface orientation and lighting conditions;

c) visual depth – degree of perceived three-dimensionality of the surface, related to the layering of levels and geometric complexity;

d) legibility of the texture – clarity and recognisability of the geometric configuration with respect to the distance and angle of observation;

e) perceptual variability – ability of the modular system to generate different effects from controlled parametric variations.

The study was conducted with lighting and observation conditions held constant to ensure comparability of the results, while the analysis of the prototypes used the metrics described above to systematically correlate parametric variations with the perceptual effects observed. In particular, configurations characterised by greater surface depth and inclination showed a significant increase in light-shadow contrast and visual depth, while those with higher density showed a reduction in legibility but an increase in perceptual variability (Fig. 9).

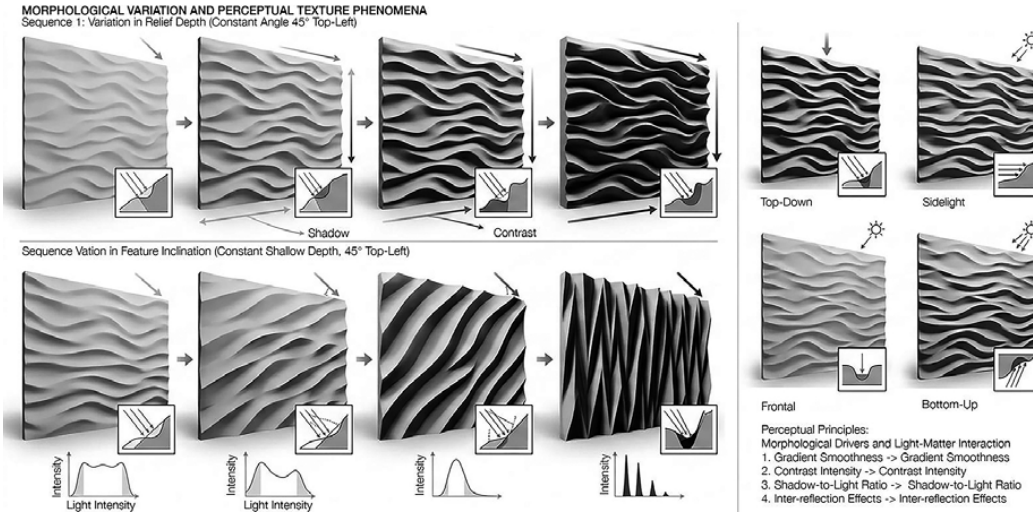
The experimentation enabled the development of a wide repertoire of formal/functional solutions, characterised by controlled variations in form, achieved through the parametric manipulation of certain fundamental geometric features (Fig. 10, 11). Starting from a basic design matrix, modules were produced with variations in depth, light incidence and material density, the combination of which generated different perceptual effects depending on lighting conditions and scale. The 3D-printed prototypes demonstrated that additive manufacturing allows a strong continuity between digital

modelling and physical production. The ability to produce complex components without the use of moulds or subtractive machining enabled high fidelity between the designed geometry and the resulting material, confirming the role of additive manufacturing in design experimentation processes (Gibson et alii, 2021).

The results confirm the consistency between the design hypotheses and the observed effects, highlighting the role of parametric variation as a means of controlling perceptual performance. The modules developed can be combined to generate different surface configurations while maintaining an overall morphological coherence. This approach can be interpreted as a form of 'flexible seriality', in which modular repetition does not coincide with the identical replication of elements, but rather with the controlled variation of each unit's physical characteristics.

This strategy redefines the meaning of the surface, attributing to it dynamic qualities not usually found in the fields of product and architectural design, qualities that are all the more sustainable and effective the more they correspond to the changing needs of reconfiguration in time and space of the surface itself. Indeed, modularity enables the replacement or reconfiguration of individual components without compromising the entire system, thereby extending product life cycles and reducing resource consumption (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023).

From a perceptual point of view, the analysis of the prototypes showed how variations in the



depth and inclination of surfaces produce different effects in the distribution of shadows and the visual perception of textures (Fig. 12). The generated configurations show how small geometric variations can also produce significant effects on the optical and, potentially, acoustic behaviour of surfaces, suggesting the possibility of using these parameters as design tools to modulate the sensory qualities of space (Fig. 13, 14).

Limitations and implications for the project | Although the results highlight the potential of combining parametric design and additive manufacturing for the development of modular surface systems, the research still has limitations that need to be considered for the full transferability of the results. In fact, the experimentation was conducted in a prototype context, in which the modules were manufactured with materials and technologies for 3D printing that are mainly used for research purposes; although these technologies allow for the exploration of complex formal configurations and variable modular systems, the transition to the industrial scale requires further investigation into production costs, manufacturing times and the physical-mechanical performance of the materials.

It should also be noted that the still early level of maturity of the research conducted suggests the appropriateness of a metrological analysis (e.g. optics, acoustics, lighting engineering) of the visual and environmental effects produced through the control of design parameters related to the design of the individual module, the construction and repetition of surface geometries, as well as the transformation of the surface itself due to processes of modular substitution or chronological metamorphosis. The literature also notes that the transition from prototyping to industrial production is one of the main challenges to the widespread adoption of additive manufacturing. Although 3D printing enables the production of highly geometrically complex components, its integration into production chains requires a rethinking of design and organisational logic, in which design plays a mediating role between technological research, production, and innovation.

A further limitation concerns the assessment of the environmental and social impacts of the design systems developed: the modularity and reconfigurability of components can contribute to extending the life cycle of products; however, the measurement of environmental benefits requires more structured analysis protocols based on Life

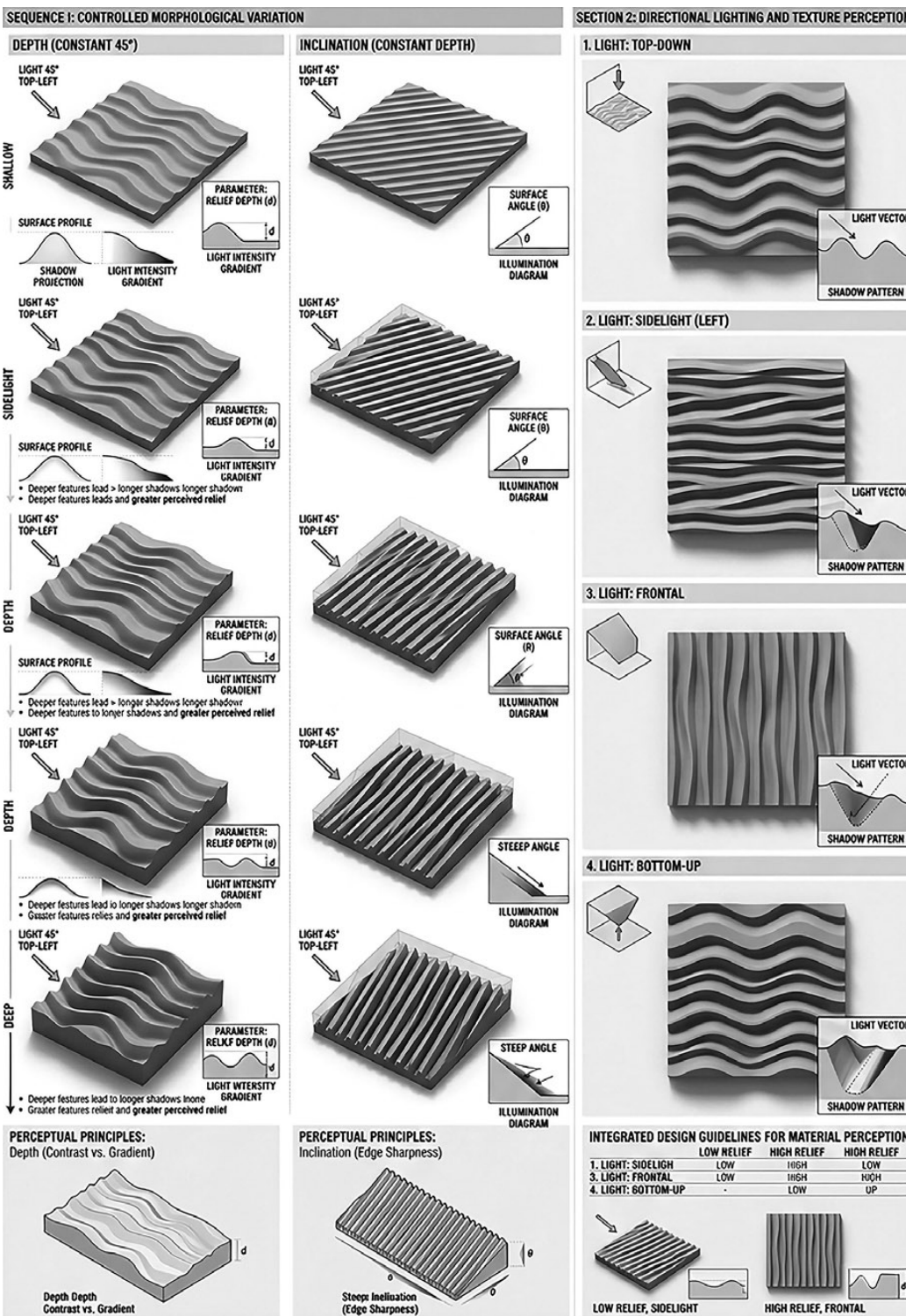


Fig. 13, 14 | Perceptual effects generated by morphological variation of surfaces and light distribution on three-dimensional textures. Differences in relief depth and slope influence shadow formation and the visual perception of surfaces, producing different perceptual configurations depending on the direction and intensity of illumination (credits: the Authors, 2026).

Cycle Assessment methodologies and integrated approaches to assessing impacts on the biosphere (Sposito and De Giovanni, 2023).

Alongside technological barriers, cultural and organisational barriers also emerge that may influence the diffusion of design approaches based on digital manufacturing. Indeed, the transition towards more sustainable production models requires the involvement of various actors along the entire industrial chain and can be slowed down by economic, regulatory and organisational factors (Maffei et alii, 2024).

Despite these critical issues, the results suggest some directions for transferability. The modular surface system based on variable seriality can be applied in various design fields, including interior design, architecture and product design. At the same time, the methodological approach based on the integration of parametric design and digital fabrication can be replicated in other contexts of design experimentation.

Overall, the research highlights the potential of design as a discipline capable of connecting technological innovation and sustainability in the transformation processes of the built environment (Fig. 15). This objective is achieved through an experimental approach, rapidly oriented towards comparison and its transfer into the fields of material production.

Relation to the Sustainable Development Goals

The research fits into the framework of the UN Sustainable Development Goals (SDGs), contributing in particular to SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). In relation to SDG 9, the integration of parametric modelling, additive manufacturing and surface design highlights the potential of digital technologies as tools for innovation in design and production processes.

With regard to SDG 11, the contribution proposes a reflection on the role of surfaces as active devices in defining the perceptual quality of spaces, with possible repercussions on the well-being of users and on the quality of the built environment; in this sense, the research suggests a perspective in which surfaces are not only finishing elements, but components capable of affecting spatial and relational dynamics. In relation to SDG 12, the adoption of modular logic and additive manufacturing processes opens up opportunities for greater resource efficiency, reduced waste, and optimised



Fig. 15 | Samples for the study tests carried out in the laboratory by means of rapid prototyping Fused Deposition Modelling in PLA (credit: the Authors, 2026).

production processes. However, these benefits depend strictly on the application conditions, in particular the choice of materials, energy consumption, and production scale.

In addition to direct benefits, the research develops indirect synergies with other goals, including SDG 13 (Combating climate change), in relation to the potential for waste reduction and process optimisation, and SDG 8 (Decent work and economic growth), in relation to the development of new skills and production chains related to digital manufacturing.

At the same time, possible trade-offs and critical issues emerge. In particular, the adoption of additive manufacturing may increase energy consumption and production costs, limiting its actual sustainability if not integrated into optimised supply chains. Furthermore, the complexity of the processes and skills required may constitute a barrier to large-scale diffusion, affecting the real transferability of the proposed models. In this perspective, the contribution highlights how the effectiveness of design strategies based on modular surfaces and digital fabrication depends on specific contextual conditions, including access to technologies, the organisation of the supply chain, and the integration between design, production, and life-cycle management.

Conclusions | One of the main contributions of the research is to propose a design approach based on variable seriality, in which modularity does not coincide with the identical repetition of components, but rather with the controlled variation of shared morphological parameters. This approach enables the generation of multiple configurations from a limited number of modular elements, expanding the project's expressive and functional possibilities. In this sense, additive manufacturing is configured as a design tool capable of supporting the development of complex systems in which design and production are closely integrated (Thompson et alii, 2016).

From a theoretical perspective, the contribution fits into the international debate on the trans-

formation of design processes in the age of digital manufacturing. The so-called 'second digital turn' has redefined the relationship between design and production, enabling the development of systems characterised by high morphological complexity and continuity between computational modelling and the materialisation of the artefact. In this scenario, design plays an increasingly important role as a discipline capable of mediating between technological innovation, production processes, and the project's cultural dimensions.

A further contribution concerns the possibility of interpreting modular surface systems as design devices consistent with the principles of the circular economy. The modularity and reconfigurability of components can extend the life cycle of design systems, facilitate maintenance, replacement, and reuse, and reduce resource consumption, thereby favouring the development of more sustainable production models.

In light of these considerations, the contribution relates to the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, in particular to Goal 9, which promotes resilient industries, sustainable infrastructure and innovation systems. The integration of digital design, additive manufacturing and modularity strategies can contribute to the development of more flexible and adaptive production models, generating synergies also with Goal 12 on responsible production and consumption and Goal 11 on sustainable cities and communities.

Despite the results, the research opens up further development prospects. It will be necessary to develop more systematic evaluation protocols to analyse the environmental and social impacts of the design systems developed, integrating life-cycle analysis methodologies and environmental performance assessment tools. At the same time, it will be appropriate to investigate the conditions that may favour the transfer of results from the experimental to the industrial scale. Overall, the research highlights the potential of design surfaces as a field of experimentation in which design can contribute to the development of sustainable innovation strategies. Interpreted as

complex design systems, surfaces can become material infrastructures capable of integrating technological research, perceptive qualities and environmental responsibility in the development of new design models for the built environment.

In light of the results, the research highlights critical issues that warrant further investigation. Firstly, there is a significant gap between prototype experimentation and the potential for transfer to industrial scale: while additive manufacturing enables high levels of geometric control and variability, it still presents limitations related to production times, costs, and integration into established production chains. Secondly, a tension emerges between perceptual qualities and actual performance: developed surfaces show a high potential for light modulation, colour variation, and the construction of visual depth; however, these qualities are predominantly evaluated qualitatively and require further verification using quantitative metrics and more advanced measuring instruments.

A further critical element concerns the role of modularity. Although it represents an effective strategy to manage complexity and promote the replicability of systems, it does not automatically guarantee sustainability benefits, which instead depend on variables such as materials, production processes and product life cycle.

In this framework, the contribution proposes a reinterpretation of the surface as a design infrastructure, understood not as a simple formal outcome but as a device capable of integrating geometric generation, material behaviour, and the perceptual dimension. This interpretation opens up possible future developments oriented towards integrating parametric modelling, digital fabrication, and performance evaluation, with the aim of overcoming the separation that still exists between the technological and experiential dimensions of design.

Acknowledgements

The research is part of the broader framework of studies entitled Sensorial Surface Design, developed within the laboratories of the Design Campus of the University of Florence. The research activity was conducted from 2023 to 2025 and is ongoing. The study was conducted within an academic research context and did not receive specific external funding. The research was developed within the Models for Design Laboratory (LMD) and the Lighting Colour Surface Lab through integrated research, teaching, and prototype experimentation, with a focus on integrating digital fabrication, surface design, perceptual studies, and material innovation.

The same research has seen the involvement of the research group (University of Tuscia) UNISOL (Universal Natural Interdisciplinary Study on daylighting), of which Dr. J. Filieri is the Scientific Coordinator; in particular, the research group has conducted a study on the inferential effects of natural light in the built environment and in indoor living contexts, through customised artificial intelligence algorithms.

All the Authors contributed to the definition of the theoretical framework, the development of the research and the

drafting of the contribution. The experimental phase, which involved modelling, prototyping and testing, was carried out collaboratively as part of the laboratory activities. The contribution is the result of a joint reflection by the Authors. Nevertheless, the paragraphs 'Introduction' and 'Conclusions' are to be attributed to G. Alfarano; 'State of the Art: designing surfaces, additive manufacturing, and modularity' and 'Experimental results' to A. Spennato; 'Methodology and research phases' and 'Limitations and implications for the project' to J. Filieri.

References

- Antonelli, P. and Burckhardt, A. (2020), *The Neri Oxman Material Ecology Catalogue*, The Museum of Modern Art, New York (NY).
- Bollzan, P. (2020), *Design e tecnologie additive – Processi di materializzazione del progetto*, Aracne Editrice, Roma.
- Carpo, M. (2017), *The Second Digital Turn – Design beyond intelligence*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Carullo, R. and Pagliarulo, R. (2013), *Interior Design – Action on surfaces – Softness*, Rubbettino Editore, Catanzaro.

Celaschi, F., Casoni, G. and Formia, E. (2024), "La mediazione del Design – L'integrazione tra agenti artificiali autonomi, produzione manifatturiera e servizi | The mediation of Design – The integration between autonomous artificial agents, manufacturing production, and services", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 334-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16282024 [Accessed 23 March 2026].

Correa, D., Bianconi, F., Filippucci, M. and Pelliccia, G. (2023), "Pattern modulari nel design igroscopico con stampa 4D – Forma e programmazione del materiale | Modular pattern in hygroscopic 4D printing design – Form and programming of the material", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 264-273. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14222023 [Accessed 23 March 2026].

Dahy, H. (2023), "Materials as design tool – Digital fabrication strategies for sustainable architecture", in *Technology | Architecture + Design*, vol. 7, issue 2, pp. 153-158. [Online] Available at: doi.org/10.1080/24751448.2023.2245707 [Accessed 23 March 2026].

Dal Buono, V. and Scodeller, D. (2016), "Intergumentary

Design – Involucri sensibili e sinestesi di superficie”, in *MD Journal*, vol. 1, pp. 14-19. [Online] Available at: mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/54/37 [Accessed 23 March 2026].

Doubrovski, Z., Verlinden, J. C. and Geraedts, J. M. P. (2012), “Optimal design for additive manufacturing – Opportunities and challenges”, in *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Washington DC, USA, August 28-31, 2011*, American Society of Mechanical Engineers, New York (NY), article DETC2011-48131, pp. 635-646. [Online] Available at: doi.org/10.1115/DETC2011-48131 [Accessed 23 March 2026].

Deepak, Pitchaimani, J., Nadimpalli, R. and Mailan Chinapandi, L. B. (2024), “Exploring the acoustic potential of 3D printed micro-perforated panels – A comparative analysis”, in *Heliyon*, vol. 10, issue 7, article e28612, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28612 [Accessed 10 April 2026].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2021), *Completing the picture – How the circular economy tackles climate change*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture [Accessed 23 March 2026].

European Commission – Directorate-General for Research and Innovation (2021), *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2777/308407 [Accessed 23 March 2026].

Frayling, C. (1994), “Research in art and design”, in *Royal College of Art Research Papers*, vol. 1, issue 1, pp. 1-5. [Online] Available at: researchonline.rca.ac.uk/384/ [Accessed 23 March 2026].

Gardiner, A., Domingo-Roca, R., Windmill, J. F. C. and Feeny, A. (2024), “An adjustable acoustic metamaterial cell using a magnetic membrane for tunable resonance”, in *Scientific Reports*, vol. 14, issue 1, article 15044, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-024-65819-2 [Accessed 10 April 2026].

Gasparini, K. (2023), “Design litico e manifattura additiva – Un connubio possibile per l’economia circolare | Lithic Design and additive manufacturing – A feasible partnership for the circular economy”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 316-325. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14272023 [Accessed 23 March 2026].

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. and Khorasani, M. (2021), *Additive manufacturing technologies*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7 [Accessed 23 March 2026].

Holstov, A., Bridgens, B. and Farmer, G. (2017), “Sustainable Materialisation of Responsive Architecture”, in *Sustainability*, vol. 9, issue 3, article 435, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su9030435 [Accessed 10 April 2026].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Van der Laan, A. Z. (2015), “Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences”, in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1965/693 [Accessed 23 March 2025].

Li, Q., Hong, Q., Qi, Q., Ma, X., Han, X. and Tian, J. (2018), “Towards additive manufacturing oriented geometric modeling using implicit functions”, in *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, vol. 1, issue 9, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s42492-018-0009-y [Accessed 10 April 2026].

Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., Prabadevi, B., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R. and Liyanage, M. (2022), “Industry 5.0 – A survey on enabling technologies and potential applications”, in *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 26, article 100257, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257 [Accessed 23 March 2025].

Maffei, S., Bolzan, P., Bianchini, M., Zeccara, F., Barbero, S., Campagnaro, C., Di Prima, N., Filippini, A., Pu-

glielli, M., Rosato, L., Lotti, G. and Pontillo, G. (2024), “Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito | Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 304-313. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16252024 [Accessed 23 March 2026].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), “Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d’involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 10 April 2026].

Mascitti, J. and Paciotti, D. (2024), “Verbal Design Modelling – Complessità, IA e innovazione di prodotto | Verbal Design Modelling – Complexity, AI and product innovation”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16292024 [Accessed 10 April 2026].

Morbiducci, R., Polverino, S. and Battaglia, C. (2023), “Stampa 4D per componenti costruttivi modulari – Applicazioni e principali sviluppi | 4D Printing for modular construction components – Applications and main developments”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 182-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14152023 [Accessed 23 March 2026].

Mzali, S., Elwasli, F., Mezlini, S., Hajlaoui, K. and Al-rasheedi, N. H. (2024), “Tribological behavior of 3D printed biomimetic surfaces”, in *Tribology International*, vol. 193, article 109352, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109352 [Accessed 10 April 2026].

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. and Hui, D. (2018), “Additive manufacturing (3D printing) – A review of materials, methods, applications and challenges”, in *Composites Part B – Engineering*, vol. 143, pp. 172-196. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012 [Accessed 10 April 2026].

Oxman, N., Ortiz, C., Gramazio, F. and Kohler, M. (2015), “Material ecology”, in *Computer-Aided Design*, vol. 60, pp. 1-2. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cad.2014.05.009 [Accessed 10 April 2026].

Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), “Il design modulare verso l’economia circolare – Dal fare per difare al fare per rifare | Modular design towards the circular economy – From making to unmake to making to remake”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 23 March 2026].

Porfirione, C., Ferrari Tumay, X. and Leggiero, I. (2024), “Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell’errore nel design e nei sistemi complessi | Knowledge, innovation, and change”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 232-241. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16202024 [Accessed 23 March 2026].

Raffaelli, R., Lettori, J., Schmidt, J., Peruzzini, M. and Pellicciari, M. (2021), “A systematic approach for evaluating the adoption of additive manufacturing in the product design process”, in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 3, article 1210, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11031210 [Accessed 10 April 2026].

Scala, P. (2023), “Non solo pelle – Modulo oggetto e modulo misura nella composizione dell’involucro architettonico | Not just skin – Object module and measure module in the composition of the architectural envelope”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 96-105. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1472023 [Accessed 10 April 2026].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), “Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere”, in *Agathón | Inter-*

national Journal of Architecture, Art and Design, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 10 April 2026].

Srivastava, M. and Rathee, S. (2022), “Additive manufacturing – Recent trends, applications and future outlooks”, in *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 7, pp. 261-287. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40964-021-00229-8 [Accessed 23 March 2026].

Su, C., Yuan, M., Fan, Y., Zhu, L. and Hu, N. (2023), “Parametric design and modular construction of a large additive-manufactured hypar shell structure”, in *ARIN*, vol. 2, article 21, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s4422-3-023-00041-0 [Accessed 10 April 2026].

Sully, A. (2024), *Interior design – Conceptual Basis*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-51410-4 [Accessed 23 March 2026].

Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B. and Martina, F. (2016), “Design for additive manufacturing – Trends, opportunities, considerations, and constraints”, in *CIRP Annals*, vol. 65, issue 2, pp. 737-760. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004 [Accessed 23 March 2026].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111&ndnr=8496&ndmenu=35 [Accessed 23 March 2026].

Zimmerman, J., Stolterman, E. and Forlizzi, J. (2010), “An analysis and critique of research through design – Towards a formalization of a research approach”, in Halskov, K. and Grave Petersen, M. (eds), *DIS 2010 | Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, Aarhus, Denmark, August 16-20, 2010*, Association for Computing Machinery, New York, NY, pp. 310-319. [Online] Available at: doi.org/10.1145/1858171.1858228 [Accessed 23 March 2026].

Weninger, J., Arnst, I., Dick, M. and Ascher, M. (2024), “Mechanisms of aesthetics – On the perception of materials and their properties”, in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 1320, issue 1, article 012023, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/1320/1/012023 [Accessed 10 April 2026].

Yang, S. and Zhao, Y. F. (2015), “Additive manufacturing-enabled design theory and methodology – A critical review”, in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, issue 1-4, pp. 327-342. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00170-015-6994-5 [Accessed 10 April 2026].

Zhang, Y., Song, Y. and Luo, J. (2023), “The effect of sustainable and natural looking on perceived aesthetics and eco-friendliness in building material evaluation”, in *Buildings*, vol. 13, issue 2, article 483, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13020483 [Accessed 10 April 2026].