

Modelli inversi. L'analogico come verifica del digitale

Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia

Abstract

L'importanza della rappresentazione come spazio per la costruzione di modelli è sempre stata centrale nella pratica architettonica. Tali modelli sono sempre serviti come mezzo di verifica delle idee, secondo un approccio progettuale definibile di form-checking. Con la transizione digitale questo rapporto si ribalta e i modelli vengono sempre più identificati da parametri e informazioni che possono fornire analisi, previsioni e individuare soluzioni, in un approccio che diviene così di form-finding. Se, tuttavia, idea e forma erano inizialmente "disegnate" nella mente e sulla carta, oggi nella mente rimangono l'idea e la figura, mentre il disegno digitale trova la forma a ragione delle prestazioni ricercate.

La ricerca qui presentata analizza tre casi di studio in cui i modelli stigmatizzano le relazioni fra ideazione, verifica e realizzazione. Il primo caso di studio riguarda la costruzione della camera di Ames, un tema iconico della percezione, realizzata come un padiglione temporaneo, generato attraverso algoritmi generativi, modelli BIM e fabbricazione digitale. Il secondo caso di studio presenta la realizzazione di una test room, modello costruito per monitorare in tempo reale e confrontare le prestazioni effettive con i dati simulati da algoritmi multi-obiettivo. Il terzo caso di studio riguarda la ricerca sperimentale su elementi architettonici igroscopici in legno stampato in 3D, modelli analoghi che mostrano il ruolo della rappresentazione nel rapporto fra progettazione, fabbricazione e responsività.

Parole chiave: design generativo, camera di Ames, fabbricazione digitale, padiglioni in legno, stampa 3D in legno.

In Catilinam

La rappresentazione come campo di ricerca riflette in modo iperbolico le trasformazioni attivate dalla transizione digitale [Hensel et al. 2006; Schumacher, 2009] nella centralità dei modelli [Bedoni et al. 1989; Migliari 2000; 2003], conquista del pensiero moderno [Baudrillard 1981] come costruzione teorica, perché, come scrive il Vasari, «il disegno è apparente espressione e dichiarazione del concetto che si ha nell'animo, e di quello che altrui si è nella mente immaginato e fabbricato nell'idea» [Vasari 1568, p. 111]. Rappresentare significa alimentare quel necessario e continuo rimando fra realtà e virtualità che è a fondamento del modello, un processo dinamico e continuo dove la matericità dei modelli analogici ha sempre avuto un ruolo fondamentale per confutare dubbi e implicite

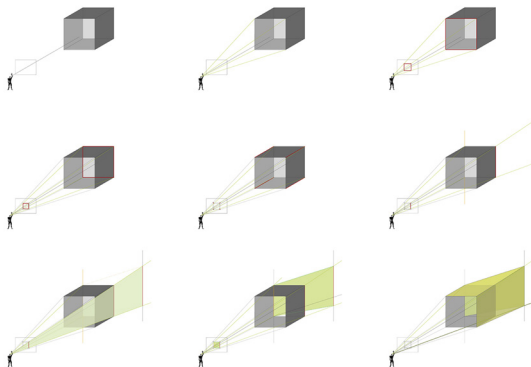
“accuse di falsità” attribuite al disegno, ascritto alla classe delle immagini. I modelli analogici da sempre hanno avuto il compito di “verificare” le conseguenze della perdita di una dimensione insita nel disegno, per l'esigenza di fare esperienza dello spazio, inteso sempre come dubbio e come conquista. Il digitale ha enfatizzato la diffidenza e la sfiducia verso le immagini, ma l'attuale ruolo dei modelli analogici trova un nuovo statuto nel *data driven design* [Bianconi et al. 2019b] e nella centralità delle performance [Oxman 2009; Hensel 2010].

Con la transizione digitale, i processi di selezione e ricomposizione necessari per il processo di conoscenza [Maturana et al. 1987; Popper 2002] convergono nella rappresentazione della forma, che si propone come un efficace

supporto per l'orientamento [Passini 1981; Sancar 1986; Meng et al. 2012; Bianconi et al. 2022] e la memorizzazione delle informazioni [Oxman et al. 2014], strumento di visualizzazione delle connessioni logiche [Jabi et al. 2013; Bianconi et al. 2019a] e dei rapporti gerarchici stabiliti fra esse [Betetini et al. 1999, p. 75]. La rappresentazione diviene così il campo di esistenza dell'informazione [Mitchell 1995; Kolarevic 2001], a ragione di esigenze di transdisciplinarietà che tale linguaggio offre per una progettazione integrata [Labaco 2013], che si alimenta della centralità delle connessioni che porta all'attuale "quinta rivoluzione industriale", dove si sta affermando il protagonismo dell'intelligenza artificiale nella gestione dell'informazione [Bianconi, Filippucci 2019].

Tali concretizzazioni rispecchiano l'approccio canonico al progetto, legato all'individuazione di soluzioni progettuali proiettate a generare forme, che prima sono verificate attraverso una serie di criteri che ne ponderano le prestazioni. Si tratta quindi di un *form-checking*, che si complessifica nell'inclusione delle diverse informazioni progettuali, che devono essere specificatamente vagliate. La progettazione sempre più diviene integrata, condizione che è esaltata dal digitale, capace sempre di includere e connettere, con la forma che si presta a garantire l'esistenza di eterogenei intrecci di entità, relazioni e logiche, identificati da parametri e informazioni, che possono essere interrogati da diverse prospettive disciplinari attraverso calcoli per offrire analisi. Nella variazione delle possibilità dei parametri che è insita nel modello, la forma può essere letta come uno dei risultati, processo che può essere letto come una trasformazione sostanziale della morfogenesi progettuale,

Fig. 1. Morfogenesi proiettiva di una delle camere di Ames (elaborazione grafica degli autori).



posta comunque la medesima finalità statutaria di trovare le migliori soluzioni. Il digitale è capace di fare calcoli sempre più prestanti ed è possibile così ricercare soluzioni "for the best" proiettate all'ottimizzazione di prestazioni performative anche impensabili [Menges 2009], non decostruendo secondo un singolo aspetto [Jones 2009], ma combinando nella visione organica e integrata del progetto [Gruber et al. 2012] in un processo che diviene così di *form finding* [Menges 2012; Adriaenssens et al. 2014].

Se si considera poi che dove si perdono i confini fra disegnare e produrre [Kolarevic 2004; Kolarevic et al. 2008] per le nuove logiche di fabbricazione digitale [Sheil 2005; Sakamoto et al. 2008; Corser 2010; Krieg et al. 2014; Austern et al. 2018] insite nei sistemi CAD/CAM [Sass et al. 2006; Chaszar et al. 2010; Sass 2012], nella robotica [Menges 2012; 2013; Gramazio et al. 2014; McGee et al. 2014; Menges et al. 2017; Eversmann et al. 2017] e nella stampa 3D [Correa et al. 2015; Le Duigou et al. 2016; Bianconi et al. 2019], si comprende che l'accusa non sia rivolta alla "tecnica di modellazione", ma nel valore del nuovo modo di "fare architettura" [Oxman et al. 2010, p. 24], un processo caratterizzato da un'ibridazione sostanziale tra realtà e virtualità. La rivoluzione digitale comporta di conseguenza un profondo rinnovamento del ruolo di verifica anche dei modelli analogici in un'inversione fra realtà e virtualità che confonde le linearità temporali: se prima la forma era "disegnata" nella mente e nella carta, con i modelli che servivano per testare e concretizzare le molteplici prestazioni di ciò che doveva essere costruito, oggi invece nell'approccio del design computazionale nella mente rimangono l'idea e la figura, con il disegno digitale che "trova" la forma a ragione delle molteplici prestazioni ricercate, che devono essere verificate attraverso le prime realizzazioni prototipali che anticipano ciò che sarà costruito. La presente tesi, a fronte delle ipotesi premesse, trova verifiche nelle sperimentazioni attuate da chi scrive, selezionate per evidenziarne specifici aspetti in "difesa" della rappresentazione.

Il modello come sperimentazione percettiva:
la **camera di Ames**

Il primo caso di studio riguarda la costruzione della *camera di Ames*, che prende il nome dallo psicologo e oftalmologo americano [Behrens 1993] che la ha proposta nel 1946 [Bamberger 2006]. Si tratta di un tema iconico della percezione, che è stata realizzata come un padiglione temporaneo,

generato attraverso algoritmi generativi, modelli BIM e fabbricazione digitale. Il noto caso studio si basa su una distorsione spaziale che genera un'immagine illusoria, sfruttando il valore del pregiudizio nella percezione e la mancanza di corrispondenza tra l'immagine proiettata e lo spazio.

Le ragioni che hanno portato ad affrontare questa ricerca e, nello specifico, la realizzazione di uno spazio costruito, derivano dal fatto che della *camera di Ames* si ha quasi esclusivamente esperienza per le immagini ma non per l'esperienza dello spazio. La ricerca ha pertanto esplorato le trasformazioni morfologiche a partire dalla piramide visiva di una stanza canonicamente stereometrica: limitando il punto di vista e variando la base della piramide, si formano spazi distorti, caratterizzati da prospettive solide definite da linee divergenti e superfici orizzontali e verticali inclinate, che ingannano gli osservatori nelle valutazioni spaziali (fig. 1).

L'approccio *form-finding* protratto è strutturato attraverso la modellazione generativa, utilizzando gli algoritmi di Grasshopper, per affrontare i vincoli spaziali e ottimizzare il progetto per il contesto espositivo (fig. 2). Questa esplorazione ha rivelato le diverse sfaccettature della progettazione architettonica, collegando i principi classici ai paradigmi di progettazione computazionale e sottolineando il ruolo attivo dell'ambiente nel processo di progettazione. La logica generativa si è integrata con i sistemi di BIM per la progettazione del legno (SEMA), spingendo i confini tra progettazione e realizzazione secondo i processi di fabbricazione (fig. 3). Il modello analogico dell'architettura è stato realizzato attraverso struttura *platform-frame* del padiglione è composta da pannelli OSB (*Oriented Strand Board*), pannelli in Fibra a Media Densità (MDF) per i pannelli interni e una finitura esterna in PVC nero microforato (fig. 4). Tra le scelte progettuali è stato previsto un pannello in corrispondenza del punto di vista vincolato, creando una scatola che rivela l'illusione solo attraverso lo schermo di uno smartphone, mostrando come le viste limitate adattino la percezione nonostante gli spunti stereoscopici.

La realizzazione della *camera di Ames*, al di là del suo fascino visivo, mostra una trasformazione dell'esperienza ed è diventata così l'occasione per ulteriori sperimentazioni sul rilievo della percezione, utilizzando biosensori digitali. La correlazione tra i dati di *eye-tracking* e le frequenze neurali ha fornito infatti approfondimenti sul comportamento e sulle risposte emotive degli spettatori all'epifania dell'illusione, che nasce solo dalla prospettiva vincolata, attuata dallo smartphone: i dati raccolti mostrano la complessità della percezione umana [Palmer 1999] e come l'apparire dell'immagine

ingannevole catturi la confusa esplorazione spaziale, chiave d'accesso che nello stupore attiva un aumento dell'attenzione in quel processo di conoscenza che mette in crisi immagini e modelli preconettuali, secondo una condizione che ha una sua validità generale per tutti i modelli analogici dell'architettura.

Il modello come verifica delle simulazioni: la test room

Il secondo caso di studio presenta la realizzazione di una *test room*, modello costruito per monitorare in tempo reale e confrontare le prestazioni effettive con i dati simulati attraverso processi di ottimizzazione digitale definiti da algoritmi multi-obiettivo. La ricerca si poneva il compito di innovare

Fig. 2. Rappresentazione generativa e ottimizzazione delle possibili camere di Ames (elaborazione grafica degli autori).

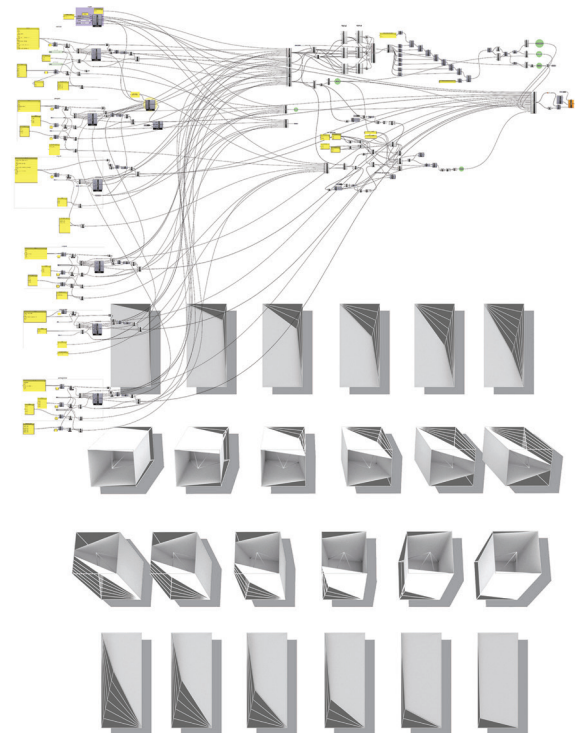
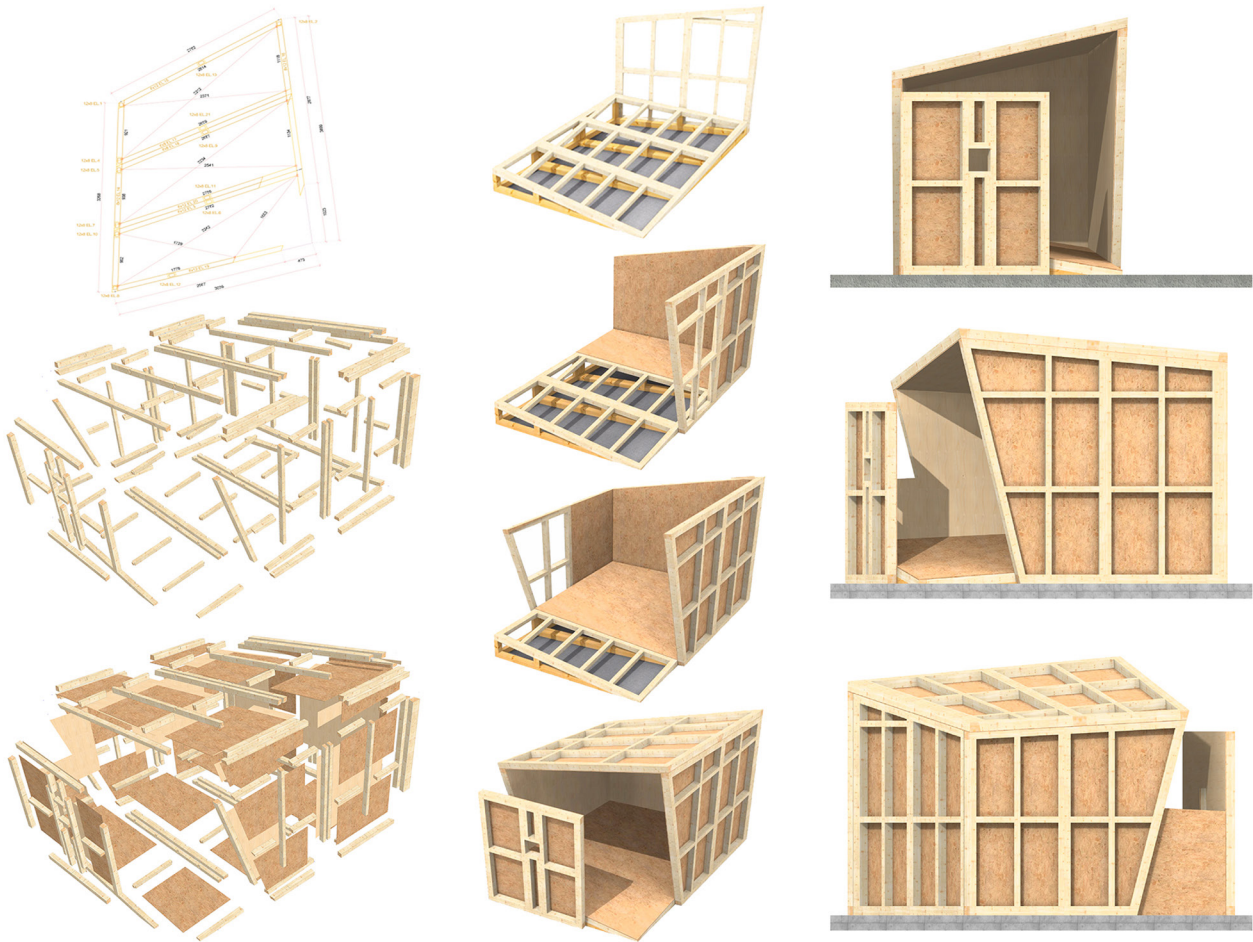


Fig. 3. Disegni per la fabbricazione digitale per la camera di Ames (elaborazione grafica degli autori).



le costruzioni in legno per aumentarne le prestazioni, ricercando soluzioni di metaprogettazione rivolte ai progettisti, che incontrano difficoltà a causa della mancanza di una formazione specialistica nelle costruzioni in legno [Bianconi et al. 2023]. Utilizzando gli algoritmi di ottimizzazione evolutiva di Octopus in Grasshopper, le soluzioni individuate sono state condivise sviluppando un'interfaccia web per esplorarne e scegliere le alternative in funzione delle condizioni imposte. Estendendo i principi della personalizzazione di massa [Benros et al. 2009] agli elementi architettonici, la ricerca ha approfondito l'ottimizzazione delle pareti perimetrali, esaminando in particolare i sistemi costruttivi *Platform-Frame* e *X-Lam* [Bianconi et al. 2019b]. Sono poi stati sviluppati algoritmi per analizzare e combinare i dati per ottenere soluzioni di pareti diversificate, tenendo conto dei costi e delle prestazioni energetiche [Seccaroni et al. 2019] (fig. 5), simulazioni che hanno individuato combinazioni di elementi per le pareti con prestazioni significativamente migliori rispetto a quelle standard utilizzate, con costi oltretutto inferiori (fig. 6).

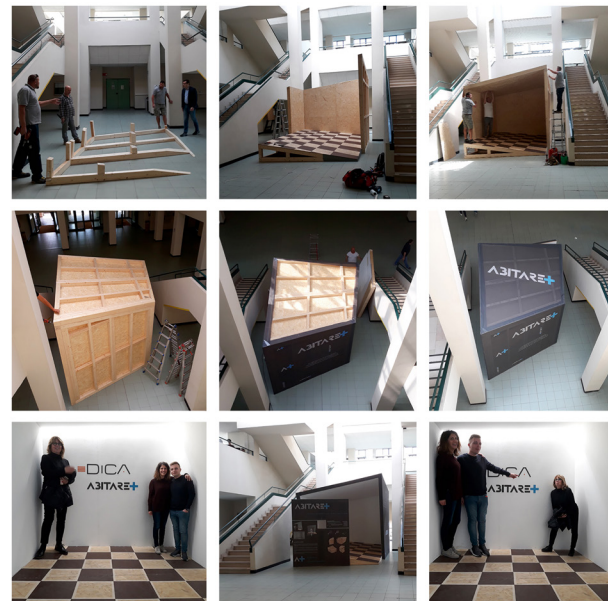
Le simulazioni digitali, nell'attrattività di tali risultati, offrono una rivoluzione strutturale dei prodotti, che prima di essere attuata ha richiesto una sua validazione a fronte di un implicito pregiudizio sul valore della rappresentazione digitale. Per assicurarsi riguardo le qualità delle soluzioni ottimizzate digitalmente, è stata costruita una *test room* temporanea in legno con struttura *Platform-Frame* dotata di una pompa di calore, pannelli fotovoltaici a film sottile, pannelli in legno sensibili all'umidità, sensori e sonde (fig. 7). Sono stati condotti monitoraggi e misurazioni per confrontare le prestazioni simulate e quelle effettive, attraverso la creazione di un sistema di monitoraggio in tempo reale e di un gemello digitale nell'ambiente BIM [Bianconi et al. 2021], con i dati che hanno dimostrato la piena affidabilità di ciò che era stato progettato digitalmente (fig. 8). La *test room* è un paradigma della ricerca contemporanea, modello analogico dell'architettura, costruito in scala, che rende visibile non ciò che è nella mente, ma ciò che rimane interno all'ecologia progettuale dello spazio virtuale, dove sembra che i dati hanno una loro esistenza che si vuol essere certi sia corrispondente alla realtà che simulano.

Il modello per la programmazione del materiale: la stampa 4D di attuatori igro-reattivi

Il terzo caso di studio riguarda la ricerca sperimentale su elementi architettonici igroscopici in legno, modelli analoghi

che mostrano il ruolo della rappresentazione nel rapporto fra realizzazione, programmazione e ottimizzazione della loro reattività, derivata dalla meso-scala del materiale e costruita attraverso una stampa additiva che include così il disegno della quarta dimensione (fig. 9). Esplorando soluzioni con simulazioni digitali, è stato evidenziato il potenziale di materiali intelligenti come il legno, noto per le sue proprietà igroscopiche, che invece di essere contrastato come avviene per i pannelli compensati, è stato assecondato per attivare risposte alla variazione di umidità. Lo studio si è quindi ispirato alla natura replicando il comportamento igroscopico delle pigne per creare un composito artificiale per il benessere igrometrico degli ambienti interni. I principi si sono estesi alla stampa 4D di compositi a base di legno, introducendo una quarta dimensione temporale per adattarsi all'umidità ambientale. La ricerca ha previsto principi di ventilazione naturale, che integrano i sistemi di condizionamento dell'aria e regolano l'umidità attraverso principi bioclimatici e la biomimetica [Benyus 1997; Vincent

Fig. 4. Realizzazione e installazione della camera di Ames per la verifica dell'inganno (elaborazione grafica degli autori).



et al. 2006] viene qui sfruttata per creare attuatori passivi responsivi. Nell'ultimo decennio, la stampa 3D, in particolare la tecnologia *Fused Deposition Modelling* (FDM), è emersa come una strada promettente per lo sviluppo di materiali con architetture complesse, compresi materiali intelligenti e vari sensori [Mustapha et al. 2021]. Nel tentativo di migliorare le prestazioni degli edifici in modo sostenibile, le priorità principali includono il raggiungimento di una bassa energia incorporata, la minimizzazione del consumo energetico durante il funzionamento e la riduzione dell'impatto ambientale delle nuove applicazioni tecniche. La ricerca di soluzioni ambientali intelligenti e autonome, basate su dati rilevati in tempo reale, ha spinto a studiare i sensori naturali, che presentano un comportamento passivo in risposta a stimoli specifici, come l'espansione e la contrazione passiva dei materiali igroscopici in seguito a variazioni dell'umidità

ambientale [Dawson et al. 1997; Elbaum et al. 2014; Elbaum 2018; Correa et al. 2020]. Il comportamento adattivo di questi elementi si basa sulla loro architettura materiale, che viene progettata, programmata e simulata attraverso strumenti di progettazione computazionale e scripting visivo, per poi essere fabbricata direttamente tramite stampa 3D, che permette di realizzare quindi modelli analoghi (fig. 10). Sfruttare il legno come modello biomimetico per i compositi stampati in 3D significa amplificare le caratteristiche di deformazione della forma del legno per creare strutture reattive. I principi biomimetici ispirati all'apertura delle squame delle pigne vengono trasferiti a strutture artificiali ingegnerizzate, ottenendo strutture a doppio strato con una risposta

Fig. 5. Morfogenesi prestazionale delle pareti per le costruzioni in legno (elaborazione grafica degli autori).



Fig. 6. Rappresentazione generativa e ottimizzazione multiobiettivo delle pareti per le costruzioni in legno (elaborazione grafica degli autori).

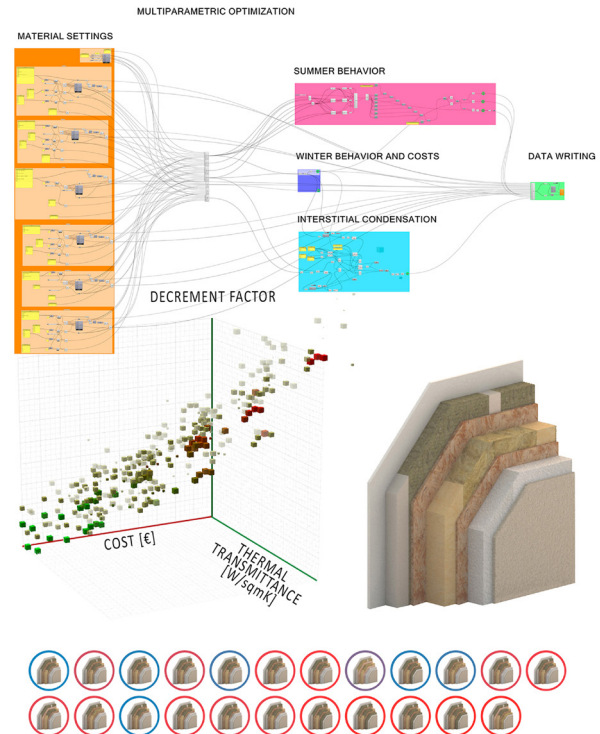
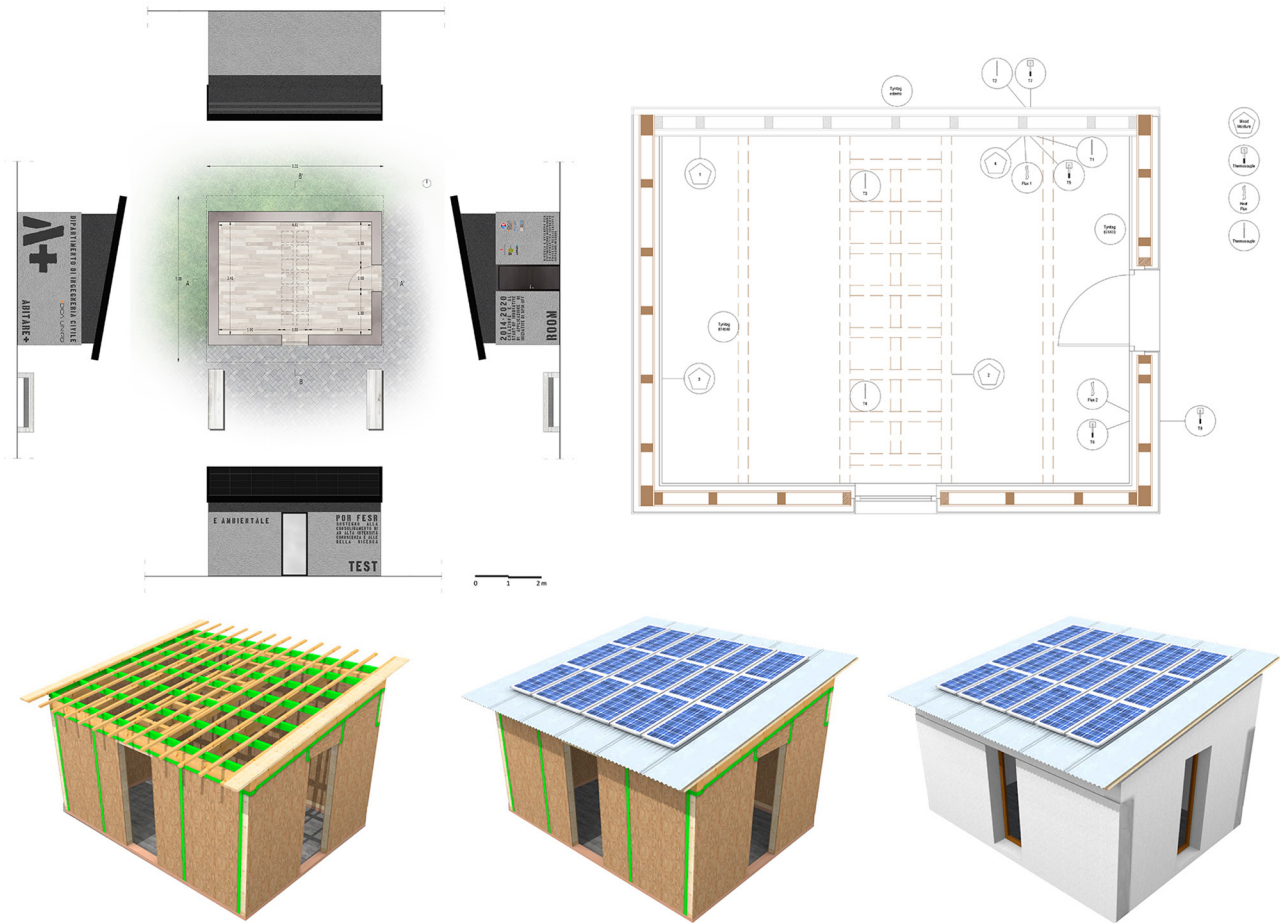


Fig. 7. Disegni per la fabbricazione digitale della test room (elaborazione grafica degli autori).



pre-programmata alle variazioni di umidità (fig. 11). Tali soluzioni sono chiaramente ideate e calcolate nella sfera virtuale della computazione digitale e concretizzate in modelli analoghi necessari per verificare l'effettivo comportamento simulato (fig. 12).

La fabbricazione di questo attuatore è stata realizzata attraverso un processo di produzione additiva, chiamato stampa 4D [Tibbits 2014], poiché la dimensione del tempo costituisce un aspetto cruciale nella definizione della forma e della configurazione finale dei modelli analogici stampati. Attraverso algoritmi di visual scripting, la rappresentazione è il primo attore nella programmazione degli *Stimulus Responsive Materials* (SRMs) ma anche nella stampa 4D, un processo guidato dai dati che mira a offrire soluzioni per migliorare gli ambienti interni con materiali rinnovabili a basso costo e costi operativi minimi [Bianconi et al. 2023]. La rappresentazione riesce così a disegnare il tempo nelle sue simulazioni ma anche a includerlo e concretizzarlo nel materiale, nelle sue forme e nei futuri comportamenti di ciò che è disegnato attraverso le macchine dal *computational design*. Si riescono così a realizzare modelli analoghi che appaiono canonici, prettamente materici, ma profondamente innovati in quanto frutto del disegno che ne influenza direttamente il comportamento fisico e la configurazione spaziale.

Conclusioni

L'articolo presentato ha permesso di esplorare in modo approfondito il ruolo cruciale della rappresentazione nell'architettura contemporanea. Il passaggio dai modelli analogici tradizionali alla centralità dei modelli digitali è analizzato attraverso una lente che abbraccia la storia dell'arte, la teoria del design e l'evoluzione delle tecnologie. Attraverso le trasformazioni attivate dalla transizione digitale, emerge la centralità dei modelli nel pensiero moderno e sottolineando il ruolo critico della rappresentazione come costruzione teorica. La verifica attraverso modelli analogici nel contesto delle immagini digitali, spesso oggetto di diffidenza, risulta fondamentale in tale contesto.

I tre casi studio hanno evidenziato come i modelli analogici continuino a giocare un ruolo fondamentale nel contesto dell'architettura digitale. Mentre la *camera di Ames* costituisce una verifica tangibile dell'inganno prospettico creato digitalmente attraverso un modello analogico, la *test room* dimostra l'importanza di validare le simulazioni attraverso

un modello fisico. La rappresentazione digitale assume inoltre un ulteriore ruolo cruciale nella programmazione di materiali responsivi, nei quali il modello analogico è fondamentale per verificare l'effettivo comportamento simulato digitalmente.

Le ricerche qui presentate provano come i modelli analogici siano dei testimoni chiave del processo di trasformazione culturale che sta investendo l'architettura. In primo luogo, la *camera di Ames* evidenzia come l'esigenza di concretizzazione sia attuata in un modello che non è solo una riduzione ma, in virtù della fabbricazione digitale, è ciò che porta al costruito, che è una puntuale concretizzazione di una famiglia di soluzioni, di una realtà che nel digitale ha un potenziale incomparabile. Il secondo caso studio evidenzia in modo maggiore la diffidenza verso il digitale, che, nella sua autonomia di modello, ha bisogno dell'analogico quale spazio di verifica, invertendo le primordiali rappresentazioni che servivano per verificare i disegni con la loro perdita dimensionale. Il terzo caso studio evidenzia come nella dicotomia fra virtuale e reale si perde la

Fig. 8. Realizzazione e installazione della test room per la verifica delle prestazioni simulate (elaborazione grafica degli autori).



Fig. 9. Morfogenesi programmata dell'igro-responsività degli attuatori lignei realizzati con stampa additiva (elaborazione grafica degli autori).

Fig. 10. Rappresentazione generativa e ottimizzazione dei cinematismi della igro-responsività programmata degli attuatori lignei realizzati con stampa additiva (elaborazione grafica degli autori).

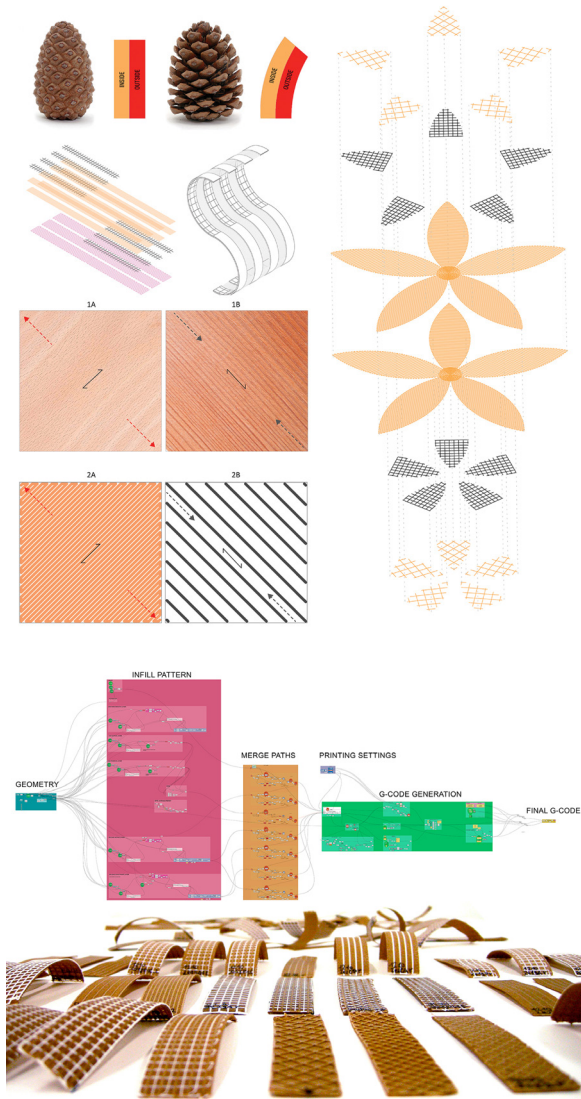


Fig. 11. Disegni per la fabbricazione digitale degli attuatori lignei realizzati con stampa additiva (elaborazione grafica degli autori).

Fig. 12. Realizzazione e installazione degli attuatori lignei realizzati con stampa additiva per la verifica della igro-responsività e dei cinematismi (elaborazione grafica degli autori).



differenza fra modello analogico e costruzione, con fabbricazione digitale che genera forme programmate per avere una loro vitalità simulata ma da verificare in prime concretizzazioni che si trasformano poi in soluzioni smart insite nell'intelligenza naturale che viene trascritta in un disegno del tempo, insito nella realizzazione così come nella risposta agli stimoli.

Le ricerche qui presentate provano come i modelli analogici siano dei testimoni chiave del processo di trasformazione culturale che sta investendo l'architettura. In primo luogo, la *camera di Ames* evidenzia come l'esigenza di concretizzazione sia attuata in un modello che non è solo una riduzione ma, in virtù della fabbricazione digitale, è ciò che porta al costruito, che è una puntuale concretizzazione di una famiglia di soluzioni, di una realtà che nel digitale ha un potenziale incomparabile. Il secondo caso studio evidenzia in modo maggiore la diffidenza verso il digitale, che, nella sua autonomia di modello, ha bisogno dell'analogico per provare, invertendo le primordiali rappresentazioni che servivano per verificare i disegni con la loro perdita dimensionale. Il terzo caso studio evidenzia come, nella dicotomia fra virtuale e reale, si perda la differenza fra modello analogico e costruzione, con fabbricazione digitale che genera forme programmate per avere una loro

vitalità simulata. Le prime concretizzazioni sono test che si trasformano in soluzioni smart in virtù dell'intelligenza naturale che viene trascritta in un disegno del tempo, insito nella realizzazione così come nella risposta agli stimoli. Il disegno si mostra come l'anima profonda dell'architettura: come lo spartito per la musica rimane al di là dell'esecuzione, così la rappresentazione è il luogo dove prende forma ciò che nelle idee rimane etereo e sfocato. I modelli analogici dell'architettura sono sempre stati momenti di verifiche, come quando chi legge lo spartito ha la necessità di suonare alcuni passaggi chiave per concretizzare ciò che sente senza sentire. Il fattore di scala che ha caratterizzato le loro concretizzazioni è sempre stato fondamentale, con il digitale che ha enfatizzato questa perdita della misura. Tale condizione è all'origine dell'attuale valore dei modelli, così segnati da una atopicità spaziale che porta ad una autonomia che genera tanto sospetto quanto il mondo delle idee. Nel *computational design*, i possibili universi delle infinite combinazioni evidenziano come la rappresentazione sia capace di accogliere sfide sempre più complesse, ma parimenti come nonostante si costruiscano universi virtuali, non si perde quel suo ruolo statutario di proiettarsi alla realizzazione, al costruito, all'architettura.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'azienda di costruzioni in legno Abitare + per il sostegno finanziario fornito per la ricerca condotta sulla camera di Ames e sulla test room. Si ringrazia inoltre David Correa (University of Waterloo) per il suo prezioso contributo allo sviluppo di attuatori igro-responsivi. La

ricerca sulla stampa 4D fa parte della tesi di dottorato di Giulia Pelliccia dal titolo *Hygroscopic indoor design. Morphological and material programming of responsive wooden bilayers and 4D printing shape-change mechanisms*, relatori Fabio Bianconi, Marco Filippucci e David Correa.

Autori

Fabio Bianconi, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, fabio.bianconi@unipg.it
 Marco Filippucci, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, marco.filippucci@unipg.it
 Giulia Pelliccia, Department of Technology and Innovation, University of Southern Denmark, gipe@iti.sdu.dk

Riferimenti bibliografici

Adriaenssens, S. et al. (2014). *Shell structures for architecture: form finding and optimization*. New York: Routledge.

Austern, G. et al. (2018). Rationalization ,methods in computer aided fabrication: a critical review. In *Automation in Construction*, 90, pp. 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.027>.

Bamberger, W. C. (2006). *Adelbert Ames, Jr: A life of vision and becomingness*. San Francisco: Bamberger Books.

Baudrillard, J. (1981). *Simulacres et Simulation*. Paris: Galilée.

Bedoni, C., Corvaja, L. (a cura di). (1989). *I fondamenti scientifici della Rappresentazione*. Roma: Kappa edizioni.

Behrens, R. R. (1993). *The man who made distorted rooms: a chronology of the life of Adelbert Ames Jr.* Iowa: University of the Northern Iowa.

Benros, D., Duarte, J. P. (2009). An integrated system for providing mass

- customized housing. In *Automation in construction*, 18(3), pp. 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.09.006>.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: Harper Perennial.
- Bettetini, et al. (1999). *Gli spazi dell'ipertesto*. Milano: Strumenti Bompiani.
- Bianconi, F., Filippucci, M. (2019). Wood, CAD and AI. Digital modelling as place of convergence of natural and artificial intelligent to design timber architecture. Innovative Techniques of Representation in Architectural Design. In F. Bianconi, M. Filippucci (Eds.). *Digital Wood Design*, pp. 3-60. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_1.
- Bianconi et al. (2019a). Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures. In *Automation in construction*, 103, pp. 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.002>.
- Bianconi et al. (2019b). *Data Driven Design per l'architettura in legno. Ricerche Rappresentative di algoritmi evolutivi per l'ottimizzazione delle soluzioni Multi-Obiettivo*. Atti del XIX Congresso Nazionale CIRIAF. Energia e sviluppo sostenibile, Perugia, 12 aprile 2019, pp. 61-72. Perugia: Morlacchi Editore University Press.
- Bianconi et al. (2021). Wood and generative algorithms for the archives of the comparison between models and reality. In *International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B4-2021, pp. 409-415. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-409-2021>.
- Bianconi et al. (2022). Immersive Visual Experience for Wayfinding Analysis. In *International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2/W1-2022, pp. 89-96. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLVI-2-W1-2022-89-2022>.
- Bianconi et al. (2023). Digital Processes for Wood Innovation Design. In M. Barberio et al. (Eds.). *Architecture and Design for Industry 4.0 Theory and Practice*, pp. 431-450. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36922-3_25.
- Bianconi et al. (2023a). Harnessing the natural intelligence of wood to improve passive ventilation in buildings. In *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 25, pp. 252-259. <https://doi.org/10.36253/techne-13656>.
- Chaszar, A., Glymph, J. (2010). CAD/CAM in the Business of architecture, engineering and construction. In R. Corser (Ed.). *Fabricating architecture: selected readings in digital design and manufacturing*, pp. 86-93. Princeton: Princeton Architectural Press.
- Correa et al. (2015). 3D-Printed wood: programming hygroscopic material transformations. In *3D printing and additive manufacturing*, 2(3), pp. 106-116. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>.
- Correa et al. (2020). 4D Pine scale: biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement. In *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2167). <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0445>.
- Corser, R. (2010). *Fabricating architecture: selected readings in digital design and manufacturing*. Princeton: Princeton Architectural Press.
- Dawson et al. (1997). How pine cones open. In *Nature*, 390(6661), p. 668. <https://doi.org/10.1038/37745>.
- Le Duigou et al. (2016). 3D printing of wood fibre biocomposites: from mechanical to actuation functionality. In *Materials & Design*, 96, pp. 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.MATDES.2016.02.018>.
- Elbaum, R. (2018). Structural principles in the design of hygroscopically moving plant cells. In A. Geitmann, J. Gril (Eds). *Plant Biomechanics: From Structure to Function at Multiple Scales*, pp. 235-246. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-79099-2_11.
- Elbaum, R., Abraham, Y. (2014). Insights into the microstructures of hygroscopic movement in plant seed dispersal. In *Plant Science*, 223, pp. 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.03.014>.
- Eversmann et al. (2017). Robotic prefabrication of timber structures: towards automated large-scale spatial assembly. In *Construction Robotics*, 1(1-4), pp. 49-60. <https://doi.org/10.1007/s41693-017-0006-2>.
- Gramazio, F., Kohler, M. (2014). *Made by robots: challenging architecture at the Large scale AD*. London: John Wiley & Sons.
- Gruber, P., Jeronimidis, G. (2012). Has biomimetics arrived in architecture? In *Bioinspiration & Biomimetics*, 7(1): 10201. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/010201>.
- Hensel, M. (2010). Performance-oriented architecture: owards a biological paradigm for architectural design and the built environment. In *FORMakademisk*, 3(1), pp. 36-56.
- Hensel, M., Menges, A. (2006). *Morpho-Ecologies*. London: Architectural Association.
- Jabi, W., Jhonson, B., Woodbury, R. (2013). *Parametric design for architecture*. London: Laurence King. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.11.4.46>.
- Jenks, C. (2002). *Visual Culture*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315084244>.
- Jones, N. L. (2009). *Architecture as a Complex Adaptive System*. Thesis of master in Architecture. Faculty of the Graduate School of Cornell University.
- Kolarevic, B. (2001). *Designing and manufacturing architecture in the digital age. Architectural Information Management*. 19th eCAADe Conference Proceedings, Helsinki 29-31 August 2001, pp. 117-123. Helsinki: eCAADe. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2001.117>.
- Kolarevic, B. (2004). *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. New York: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203634561>.
- Kolarevic, B., Klinger, K. (2008). *Manufacturing material effects: rethinking design and making in architecture*. New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315881171>.

- Krieg et al. (2014). HygroSkin: meteorosensitive pavilion. In F. Gramazio, M. Kohler, S. Langenberg (Eds.), *Fabricate: negotiating design and making*, pp. 272-279. Zürich: UCL Press.
- Labaco, R. (2013). *Out of hand: materializing the postdigital*. London: Black Dog Publishing.
- Lévy, P. (1994). *L'intelligence collective. Pour une anthropologie du cyberspace*. Paris: La Découverte.
- Maturana, H. R., Varela, F. J., Ceruti, M. (1987). *L'albero della conoscenza*. Milano: Garzanti.
- McGee, W., Ponce de León, Mo. (Eds.). (2014). *Robotic fabrication in architecture, art and design 2014*. Cham: Springer Science & Business Media.
- Meng, F., Zhang, W. (2012). A Review of wayfinding and a new Virtual Reality system for wayfinding studies. In *International Journal of Services Operations and Informatics*, 7(2-3), pp. 197-211. <https://doi.org/10.1504/ijsoi.2012.051399>.
- Menges, A. (2009). Performative wood: integral computational design for timber constructions. In S. T. D'Estrée, R. Loveridge, D. Pancoast (Eds.), *Building a Better Tomorrow*. Proceedings of the 29th Annual Conference of the ACADIA, Chicago 22-25 October, 2009, pp. 66-74. Chicago: Association for Computer-Aided Design in Architecture. <https://doi.org/10.1002/ad.1956>.
- Menges, A. (2012). Material computation: higher integration in morphogenetic design. In *Architectural Design*, 82(2), pp. 14-21. <https://doi.org/10.1002/ad.1374>.
- Menges, A. (2013). Morphospaces of Robotic Fabrication. In S. Brell-Cokcan, J. Braumann (Eds.), *Rob I Arch 2012*, pp. 28-47. Vienna: Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0_3.
- Menges et al. (2017). *Fabricate: Rethinking design and construction*. London: UCL Press.
- Migliari, R. (2000). *Fondamenti della rappresentazione geometrica e informatica dell'architettura*. Roma: Kappa.
- Migliari, R. (2003). *Geometria dei modelli*. Roma: Kappa.
- Mitchell, W. J. (1995). *City of Bits: Space, Place, and the Infobahn*. Cambridge: MIT Press.
- Mustapha, K. B., Metwalli, K. M. (2021). A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites. In *European Polymer Journal*, 156: 110591. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110591>.
- Oxman, R. (2009). Performative design: a performance-based model of digital architectural design. In *Environment and Planning B. Planning and Design*, 36(6), pp. 1026-1037. <https://doi.org/10.1068/b34149>.
- Oxman, R., Oxman, R. (2010). Introduction. In R. Oxman, R. Oxman (Eds.), *The new structuralism: design, engineering and architectural technologies*, pp. 14-24. Wiley.
- Oxman, R., Oxman, R. (Eds.). (2014). *Theories of the digital in architecture*. London: Routledge.
- Palmer, S. E. (1999). *Vision science: photons to phenomenology*. Cambridge: MIT Press.
- Passini, R. (1981). Wayfinding: a conceptual framework. In *Urban Ecology*, 5(1), pp. 17-31. [https://doi.org/10.1016/0304-4009\(81\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0304-4009(81)90018-8).
- Picon, A. (2010). *Digital culture in architecture*. Basel: Birkhäuser.
- Popper, K. R. (2002). *Conoscenza oggettiva. Un punto di vista evoluzionistico*. Roma: Armando editore.
- Sakamoto, T., Ferré, A. (2008). *From control to design: parametric/algorithmic architecture*. New York: Actar-D.
- Sancar, F. H. (1986). Wayfinding in architecture. In *Landscape Journal*, 5(1), pp. 71-73.
- Sass, L. (2012). Direct building manufacturing of homes with digital fabrication. In N. Gu, X. Wan (Ed), *Computational design methods and technologies: applications in CAD, CAM, and CAE education*, pp. 1231-1242. New York: IGI Global.
- Sass, L., Botha, M. (2006). The instant house: a model of design production with digital fabrication. In *International Journal of Architectural Computing*, 4(4), pp. 109-123. <https://doi.org/10.1260/147807706779399015>.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: a ew global style for architecture and urban design. In *Architectural Design*, 79(4), pp. 14-23. <https://doi.org/10.1002/ad.912>.
- Seccaroni, M., Pelliccia, G. (2019). Customizable social wooden pavilions: a workflow for the energy, emergy and perception optimization in Perugia's parks. In F. Bianconi, M. Filippucci (Eds.), *Digital Wood Design. Innovative techniques of representation in architectural design*, pp. 1045-1062. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_42.
- Sheil, B. (2005). Design through making: an introduction. In *Architectural design*, 75(4), pp. 5-12. <https://doi.org/10.1002/ad.97>.
- Tibbits, S. (2014). 4D printing: multi-material shape change. In *Architectural Design*, 84(1), pp. 116-121. <https://doi.org/10.1002/AD.1710>.
- Vincent et al. (2006). Biomimetics: its Practice and theory. In *Journal of the Royal Society, Interface*, 3(9), pp. 471-482. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>.