

ARTICLE INFO

Received	18 September 2023
Revised	15 October 2023
Accepted	29 October 2023
Published	31 December 2023

STAMPA 4D PER COMPONENTI COSTRUTTIVI MODULARI

Applicazioni e principali sviluppi

4D PRINTING FOR MODULAR CONSTRUCTION COMPONENTS

Applications and main developments

Renata Morbiducci, Salvatore Polverino, Caterina Battaglia

ABSTRACT

A partire dalla fine del XX secolo le tecniche di fabbricazione digitale sono state caratterizzate da una rapida espansione nei diversi ambiti dell'attività umana. In particolare nel settore delle costruzioni il loro impiego ha consentito la produzione di inediti componenti modulari, personalizzabili in base agli specifici requisiti di impiego. In tale ambito si inserisce l'utilizzo delle tecniche di manifattura additiva mediante stampa 4D per la produzione di elementi modulari responsivi; questi ultimi, tuttavia, nonostante siano in grado di contribuire alla mitigazione degli effetti del cambiamento climatico, sono ancora scarsamente impiegati. Il presente saggio intende analizzare le principali peculiarità delle tecniche di stampa 4D per la produzione di elementi modulari per l'architettura, evidenziandone le potenzialità e i principali limiti che ne influenzano l'impiego.

Since the end of the 20th century, a rapid expansion has characterised digital fabrication techniques in different areas of human activity. In particular, in the construction sector, their use has enabled the production of unprecedented modular components that can be customised according to specific application requirements. This includes the use of additive manufacturing techniques employing 4D printing for the production of responsive modular elements. However, despite being able to contribute to mitigating the effects of climate change, they are still scarcely used. This essay intends to analyse the main peculiarities of 4D printing techniques for the production of modular elements for architecture, highlighting their main limitations and potentialities that influence their use.

KEYWORDS

materiali innovativi, materiali intelligenti, stampa 4D, manifattura additiva, costruzione modulare

innovative materials, smart materials, 4D printing, additive manufacturing, modular construction

Renata Morbiducci, Architect and PhD, is a Full Professor of Technical Architecture at the University of Genoa (Italy), a member of the NGO RINGO, COP-UNFCCC Delegation and a Scientist Responsible for international and national projects. She researches the themes of innovation in building techniques for the environmental sustainability of the construction sector. E-mail: renata.morbiducci@unige.it

Salvatore Polverino, Building Engineer-Architect and PhD, is a Researcher in Technical Architecture at the University of Genoa (Italy). He researches construction techniques and applications of technologically advanced materials in architecture and construction. E-mail: salvatore.polverino@unige.it

Caterina Battaglia, Engineer and PhD Candidate at the Department of Architecture and Design of the University of Genoa (Italy), carries out research in building site digitisation and technological innovation, focusing on the potential of 3D printing in the construction sector. E-mail: caterina.battaglia@edu.unige.it



Il settore delle costruzioni rappresenta una componente fondamentale del mercato economico mondiale (Ghobakhloo, 2020) e si stima che attualmente produca un volume di investimenti pari a 9,7 trilioni di dollari, valore che è destinato ad aumentare in maniera consistente nel corso del prossimo decennio fino a raggiungere la soglia dei 14 trilioni entro il 2037 (Oxford Economics, 2023). Nonostante sia uno degli ambiti trainanti del sistema economico il settore delle costruzioni è stato solo parzialmente investito dalle molteplici innovazioni che hanno rivoluzionato i principali campi dell'attività umana negli ultimi anni (Fig. 1; Oke et alii, 2023); infatti, a causa di numerose barriere culturali, sociali ed economiche, la piena transizione verso una nuova realtà evolutiva, la cosiddetta Costruzione 4.0 (El Jazzer et alii, 2020), è un processo ancora problematico e tuttora in itinere. Le difficoltà di evoluzione del settore edile vanno di pari passo con la crescente sensibilità verso la sostenibilità ambientale ed energetica, che richiede un cambio del paradigma con l'adozione di strategie e azioni etico-economiche ormai imprescindibili, tra le quali un uso oculato delle risorse non rinnovabili, per contrastare gli effetti del cambiamento climatico (Gallego-Schmid et alii, 2020) e le ricadute determinate dai recenti avvenimenti bellici (Hryhorovskiy et alii, 2022).

A fronte del suddetto scenario è possibile individuare numerose tendenze di ricerca che riguardano il processo di costruzione, in particolare la digitalizzazione, e il prodotto finale, con la comparsa di inedite soluzioni tecniche ad alte prestazioni (Ribeirinho et alii, 2020). Negli ultimi anni le modalità di realizzazione dei componenti costruttivi sono cambiate, accostando alla standardizzazione di massa una produzione personalizzata rivolta a specifiche esigenze di impiego (Pasco, Lei and Aranas, 2022); tale evoluzione è resa possibile grazie alle tecnologie produttive digitali e a nuove figure professionali con competenze transdisciplinari (Canestrino, 2021) animate anche dalla volontà di raggiungere una nuova forma di società incentrata sull'autoproduzione (Russo and Morretti, 2020), una modalità di realizzazione accessibile a tutti, facilmente replicabile e a costo contenuto (Pone, 2022).

Nell'ambito delle costruzioni, tra le tecnologie impiegate nella fabbricazione digitale che hanno conosciuto una significativa evoluzione negli ultimi anni, vi è la manifattura additiva (Li et alii, 2020; Fig. 2); tale sviluppo è stato possibile sia grazie al progressivo aumento delle dimensioni dell'elemento stampato, che ha consentito la 'produzione' anche di intere abitazioni (Sposito and Scalisi, 2017), sia attraverso l'impiego di materiali innovativi altamente performanti e in grado di rispondere alle sempre più pressanti questioni ambientali; esempi rilevanti sono le sperimentazioni di Italcementi sull'impiego di compositi cementizi per la stampa 3D o dell'italiana WASP con il ritorno a materiali naturali quali la terra cruda e fibre vegetali (Di Dio et alii, 2022).

Contemporaneamente le scienze dei materiali da costruzione hanno condotto ricerche con l'obiettivo di conferire un'inedita dinamicità ai componenti edilizi, donando all'involucro esterno una capacità di adattamento e responsività alle sollecitazioni esterne (Jang, Lee and Kim, 2013); per superare la necessità di impiegare sensori e attuatori, si è intervenuti sulla progettazione della

materia a scala nanometrica, creando una nuova categoria che è quella dei cosiddetti 'smart materials' (Clifford et alii, 2017). La manifattura additiva ha impiegato tali materiali per la produzione di elementi modulari ispirati al mondo naturale (Paoletti, 2017; Tucci, 2017), caratterizzandoli di recente con una quarta dimensione (4D) per impiegarli come elementi costruttivi dinamici e adattivi attraverso un approccio customer-based (Haleem et alii, 2021): in tal modo si possono ottenere componenti edilizi complessi ottimizzati per le particolari condizioni d'impiego, in grado di adattarsi ai continui cambiamenti ambientali e con un elevato livello di prestazioni.

La stampa 4D, nonostante le enormi potenzialità nel campo delle costruzioni, è oggi principalmente impiegata in settori tecnologicamente più avanzati, come quello dell'ingegneria biomedica (Agarwal et alii, 2021); tra i diversi limiti per un'applicazione del 4D nel settore edile è da segnalare l'incompatibilità tra tecniche di produzione e la scala di applicazione. Per superare tali limiti, il concetto di modulo, inteso come unità elementare di un insieme, ripetibile e riproducibile, riveste un ruolo fondamentale: le caratteristiche di flessibilità, adattabilità, facilità di trasporto e montaggio, proprie della discretizzazione di elementi costruttivi in componenti modulari, rendono superabili i limiti di scalabilità tuttora presenti (Minunno et alii, 2020).

Tuttavia, malgrado vi sia un crescente interesse riguardo l'applicazione di tecniche di manifattura additiva nel settore delle costruzioni, il tema del rapporto tra modularizzazione e stampa 4D è ancora scarsamente affrontato in letteratura e risulta solo marginalmente analizzato il graduale passaggio tra la produzione edilizia 3D e l'impiego della tecnica 4D in costruzioni modulari.

Con il presente saggio gli Autori vogliono intervenire all'attuale dibattito sull'applicazione delle tecniche di fabbricazione digitale in architettura, analizzando il rapporto tra la modularizzazione nei processi di manifattura additiva e la stampa 4D nel settore delle costruzioni, al fine di un progressivo sdoganamento di tali soluzioni per la realizzazione di edifici adattivi e responsivi. Per raggiungere la predetta finalità il saggio analizza dapprima le principali tendenze di ricerca sull'impiego di elementi modulari prodotti con manifattura additiva, per poi soffermarsi sulle maggiori peculiarità del processo di stampa 4D e, infine, esamina i principali fattori che ne hanno agevolato o limitato l'impiego nel settore delle costruzioni. Tale disamina avviene attraverso un'analisi delle prime applicazioni della stampa 4D in architettura ed edilizia, delineandone i possibili sviluppi futuri.

In particolare il presente lavoro prende in esame specifici casi studio che rappresentano esempi emblematici di come il processo di modularizzazione consenta l'applicazione di tecniche proprie della manifattura additiva nell'ambito delle costruzioni e permetta l'introduzione dell'elemento temporale quale parametro progettuale, superando la tradizionale staticità dell'opera costruttiva. Si vuole, dunque, costituire una base di conoscenza per future attività di ricerca sulle possibili applicazioni di sistemi modulari realizzati mediante stampa 4D da impiegarsi, ad esempio, per la realizzazione di involucri edilizi adattivi.

Il modulo per la manifattura digitale nelle costruzioni | A partire dalla fine della prima decade

del XXI secolo si è assistito a un progressivo salto di scala dell'oggetto stampato, con la comparsa dei primi esempi di abitazioni realizzate attraverso tecniche di fabbricazione digitale (Sposito and Scalisi, 2017), tra cui quelle prodotte con processo di estrusione a controllo assiale o con il contour crafting, che consiste nella distribuzione per strati di miscele cementizie. In breve tempo, a partire dall'anno della sua presentazione nel 2009 presso la University of Southern California, quest'ultima tecnica si è rapidamente diffusa nel settore delle costruzioni, consentendo la realizzazione di interi edifici (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

I principali limiti di queste prime applicazioni sono riconducibili alla scarsa scalabilità del processo, in quanto le dimensioni del manufatto realizzabile dipendono dal raggio di azione delle strumentazioni a disposizione (Hager, Golonka and Putanowicz, 2016); inoltre la tipologia di materiale impiegata è spesso caratterizzata da un ciclo produttivo altamente impattante, in contrasto con le ormai imprescindibili istanze di sostenibilità ambientale (Heywood and Nicholas, 2023).

Per far fronte alla prima problematica evidenziata sono comparse le prime esperienze tese a una riduzione di scala delle attrezzature per la stampa; in quest'ambito sono comprese le prime esperienze inerenti all'uso di operatori robotici di dimensioni contenute che, a seguito della discretizzazione dell'opera in moduli, procedono parallelamente alla costruzione del manufatto edilizio. Tali tecniche presentano numerosi vantaggi rispetto alla stampa tradizionale tra cui, ad esempio, la maggiore mobilità, manovrabilità e libertà di scelta dei materiali da impiegare, in quanto, con una costruzione 'diffusa', sono superati i limiti dimensionali e operativi delle attrezzature tradizionali di stampa. Nel contempo, uno dei principali limiti di tale approccio è rappresentato dalla possibilità di realizzare unicamente strutture verticali, mentre, per gli elementi orizzontali, occorre adottare una produzione a pie d'opera e il successivo montaggio (Dörfler et alii, 2022).

La discretizzazione del manufatto edilizio in moduli, da realizzare in parallelo, è alla base anche dell'esperienza che ha portato alla costruzione della DFAB House, sviluppata e realizzata dall'ETH di Zurigo; tale costruzione, che costituisce uno dei primi esempi di edificio abitabile realizzato unicamente mediante tecniche di fabbricazione digitale (Graser, Kahlert and Hall, 2021), è collocata all'interno di una struttura denominata NEST (Fig. 3), dove ogni singola unità abitativa costituisce un modulo sperimentale abitabile, tenuto al rispetto della normativa edilizia locale. La DFAB House, in particolare, costituisce la porzione di edificio posta all'ultimo piano del complesso e la sua realizzazione ha visto l'unione di diverse tecniche della fabbricazione digitale, il cui collante è stata la discretizzazione degli elementi costruttivi in componenti modulari realizzati in sito o presso le aziende partner del progetto (Graser, Kahlert and Hall, 2021; Fig. 4).

Il concetto di modularizzazione dell'opera da realizzare è presente anche nelle esperienze di ricerca relative alle tecniche di manifattura additiva incentrate sull'utilizzo di materiali sostenibili; tra quest'ultime si ricordano le sperimentazioni sull'impiego di miscele a base di terra cruda, elementi naturali caratterizzati da un basso impatto ambientale (Sposito and Scalisi, 2019). In tale ambito di

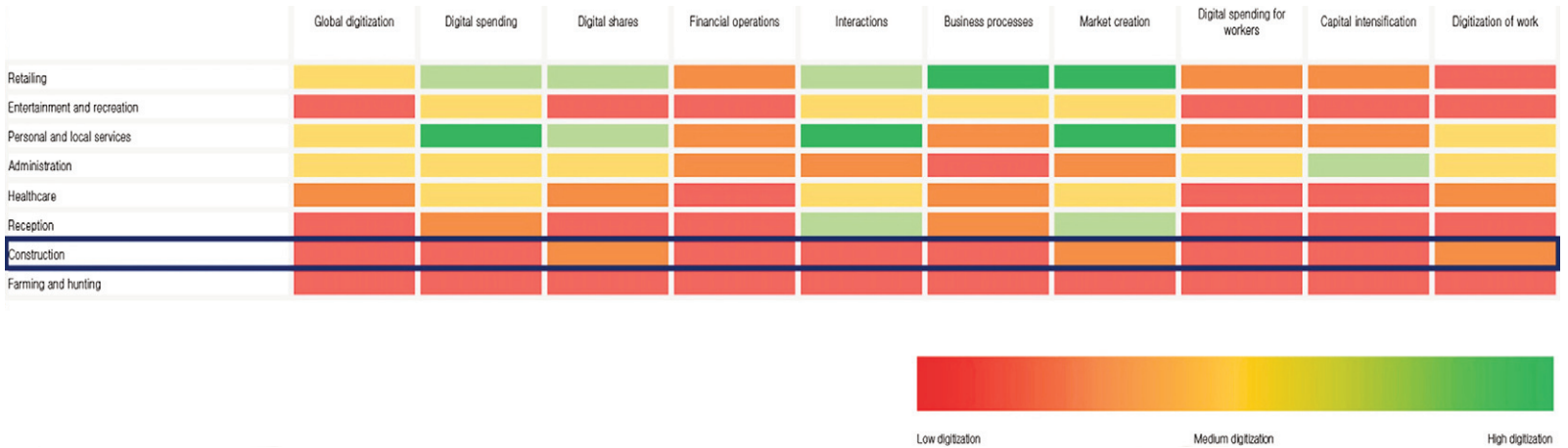


Fig. 1 | Level of digitisation in the construction sector (source: McKinsey Global Institute, 2017; adapted by the Authors, 2023).

ricerca, si segnala l'attività dello IAAC di Barcellona in collaborazione con WASP, che nel 2022 ha condotto alla realizzazione di TOVA, il primo edificio spagnolo stampato interamente in 3D tramite l'impiego di una miscela a base di terra, aloe, albume d'uovo ed enzimi (Fig. 5). L'esperienza maturata da WASP in altri progetti precedenti, quali Gaia e Itaca, ha permesso la realizzazione di elementi murari modulari stampati con materiale recuperato a meno di 50 metri dal sito di costruzione, mediante la tecnica di stampa Crane (IAAC, 2022).

Le suddette esperienze sperimentali, sebbene rappresentative dell'evoluzione delle tecniche di manifattura additiva nel campo delle costruzioni, sono ancora legate a metodologie proprie di un'architettura tradizionale, di tipo statico e non capace di adattarsi al variare delle condizioni ambientali; a questo proposito, la volontà di conferire dinamicità al manufatto prodotto ha favorito lo sviluppo di tecniche di produzione 4D introducendo così la dimensione temporale.

Stampa 4D quale ultima frontiera della manifattura additiva | Nonostante la fabbricazione digitale sia un processo che risale al finire del XX secolo, la stampa 4D è stata teorizzata per la prima volta solo nel 2014 ed è stata definita come tecnica di manifattura additiva che consente la produzione di elementi in grado di cambiare la propria forma o struttura se sottoposti a stimoli esterni (Tibbits, 2014). Questa prima definizione, introdotta dai ricercatori del MIT di Boston, comprende solo componenti caratterizzati da una dinamicità della forma, ma in seguito altri Autori hanno inglobato in tale categoria ulteriori tipologie di reazioni, come, ad esempio, la variazione delle proprietà ottiche (Pei, 2014).

L'innovazione in questo campo, rispetto alle tecniche 3D tradizionali, risiede nel materiale impiegato, capace di reagire a stimoli esterni e definito quindi smart (Addington and Schodek, 2005). In particolare l'aspetto innovativo risiede nel meccanismo di reazione che è insito nella materia, senza un deterioramento della stessa (Rastogi and Kandasubramanian, 2019), e che opera in maniera autonoma permettendo così di ottenere elementi definiti auto-assemblanti (Khoo et alii, 2015).

Dall'analisi delle esperienze applicative emerge come il processo di stampa 4D sia caratterizzato dalle seguenti fasi (Fig. 6): progettazione del modello matematico dell'elemento, scelta della

tecnica di fabbricazione digitale, selezione dello smart material e, infine, la verifica del meccanismo di reazione (Momeni et alii, 2017). Mentre per la realizzazione del componente si adottano le tecniche di produzione proprie della stampa 3D (Pei, Loh and Nam, 2020), quali ad esempio la modellazione a deposizione fusa (FDM) o a filo fuso (FFM)¹, ciò che connota il processo illustrato è l'importante ruolo rivestito dalle fasi di progettazione e scelta del materiale; infatti solo attraverso una rigorosa modellazione matematica è possibile ottenere l'esatta morfologia del componente tale da innescare i processi di adattamento al variare delle condizioni ambientali.

Dalla scelta del materiale smart da impiegare deriva la suscettibilità a determinati stimoli e il conseguente meccanismo di reazione. Principalmente sono impiegati elementi a memoria di forma a base di leghe metalliche (Shape Memory Alloys – SMA) o polimeri (Shape Memory Polymers – SMP), come riportato in Tabella 1. Le leghe rispondono a stimoli di tipo elettromagnetico o alla variazione di temperatura e le più utilizzate nel settore delle costruzioni, quali sensori e attuatori, sono a base di nichel-titanio (Fiorito et alii, 2016; Kim et alii, 2023). I polimeri a memoria di forma sono caratterizzati da un'elevata duttilità di impiego che ne consente l'uso in strutture composite o programmabili, in cui è possibile ottenere molteplici forme al variare delle condizioni ambientali (Ahmed et alii, 2021). In base al meccanismo di reazione gli SMP sono distinguibili in materiali reagenti al calore o termoreattivi (Ansari et alii, 2018), alla luce o fotoreagenti (Li, Schenning and Bunning, 2019), all'energia magnetica (Filipcei et alii, 2007) o all'acqua (Zhang et alii, 2022).

Le attuali applicazioni della stampa 4D sono, però, limitate a quei settori tecnologici (robotica, aerospaziale, biomedicale, ecc.) maggiormente inclini alla sperimentazione di nuove tecniche e dove è consolidato l'impiego di materiali a memoria di forma (Strzelec, Sienkiewicz and Szmechtyk, 2020); infatti, in tali campi, l'introduzione della tecnologia 4D ha consentito un'ulteriore evoluzione del livello tecnologico, favorendo l'uso di soluzioni personalizzate in grado di adattarsi alle molteplici condizioni di operatività. Solo negli ultimi anni tali peculiarità sono state valorizzate anche nell'ambito delle costruzioni, arrivando a essere parte del più ampio processo di trasferimento di innovazione dai settori tecnologicamente avanzati a quello

edilizio, così come già avvenuto in passato per altre soluzioni all'avanguardia (Miodownik, 2015).

Il modulo nelle costruzioni 4D | Fin dalle prime sperimentazioni la stampa 4D è sempre stata strettamente connessa al concetto di modulo. Lo stesso Tibbits infatti, ancor prima di introdurre il concetto nel 2014 quale tecnica di produzione basata sulla fabbricazione digitale di elementi auto assemblanti (Tibbits, 2014), nel 2012 ha teorizzato la possibilità di discretizzare le architetture in elementi modulari in grado di comporre autonomamente strutture complesse (Tibbits and Cheung, 2012). Tale teorizzazione, oltre a concettualizzare nuove possibili tecniche costruttive che comporterebbero risparmi in termini di tempi e costi di realizzazione, introduce il concetto di 'materiale vivente', dove il singolo componente costruttivo cresce evolvendo nel tempo a partire dalla sua produzione.

L'idea di elementi modulari viventi è stata alla base di diversi programmi di ricerca tra cui l'Engineered Living Materials (ELM), lanciato nel 2016 dalla Defense Advanced Research Project Agency (DARPA, 2016) del Governo USA e finalizzato alla realizzazione di materiali di origine naturale, fabbricati digitalmente, in grado di possedere capacità autoriparanti e di adattamento alla variazione delle condizioni ambientali.

Nel suddetto contesto si collocano i primi pionieristici lavori del Mediated Matter Lab del MIT finalizzati alla produzione di elementi modulari dinamici mediante tecniche di bio-stampaggio (Smith et alii, 2020); quest'ultime sono impiegate per la realizzazione di strutture a torre denominate Agua-hoja, in cui l'uso di materiali innovativi biocompatibili e adattivi coesiste con l'utilizzo di tecniche di fabbricazione digitale (Fig. 7).

In particolare in tali opere sono stati utilizzati materiali biopolimerici a memoria di forma a base di carboidrati di origine naturale, quali chitosano, pectina e cellulosa, che ne fanno una delle prime applicazioni di stampa 4D su grande scala² (Fig. 8). La quarta dimensione si manifesta in modo duplice: non solo nella capacità dinamica del materiale che, essendo costituito da biopolimeri a memoria di forma, reagisce a variazioni di umidità cambiando la propria rigidità, ma anche nell'evoluzione del manufatto durante l'intera vita utile dell'installazione; quest'ultima, infatti, è progettata per degradarsi se esposta all'acqua piovana, costituendo una costru-

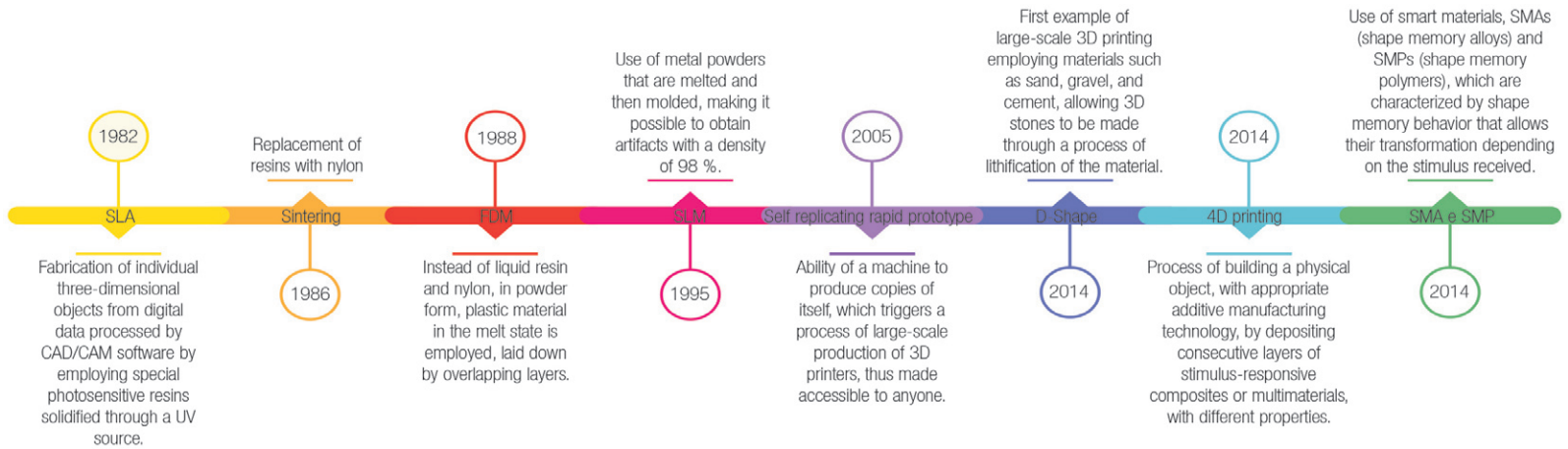


Fig. 2 | Time sequence of the evolution of additive manufacturing techniques (credit: the Authors, 2023).

zione 'vivente' destinata a scomparire una volta terminato l'uso (Tai et alii, 2018).

La capacità di produrre elementi personalizzabili e responsivi, inoltre, ha favorito l'impiego delle tecniche di stampa 4D per la realizzazione di componenti per involucri in grado di adattarsi alla variazione delle condizioni ambientali, ai fini della riduzione del consumo energetico dell'edificio (Alotaibi, 2015; Hosseini, Mohammadi and Guerra-Santini, 2005). Tale campo di applicazione nasce come evoluzione dei tradizionali sistemi di schermatura solare mobili, dove il movimento dei singoli moduli è garantito da meccanismi motorizzati che concorrono ai consumi energetici dell'edificio e che necessitano di una continua opera di manutenzione per il loro corretto funzionamento (Yi et alii, 2020).

La stampa 4D, coniugando manifattura additiva e materiali a memoria di forma, consente la produzione di moduli in grado di attivarsi autonomamente, evitando l'impiego di ulteriori dispositivi meccanici e semplificando così il sistema schermante grazie a una 'intelligenza primitiva' propria del materiale (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021). Tale ambito è stato caratterizzato, dapprima da sistemi ibridi, le cui tecniche di fabbricazione digitale sono state impiegate congiuntamente a sistemi tradizionali; a riguardo, si segnala l'esperienza di Hwang Yi (2021), che ha proposto una prima applicazione di sistemi misti per la realizzazione di componenti costruttivi adattivi nella regolazione dell'apporto della radiazione solare in ambienti interni.

La suddetta sperimentazione è stata caratterizzata dallo studio e prototipazione di un sistema modulare a base di policarbonato e acido polilattico stampati in 3D che, tramite l'applicazione di elementi realizzati con leghe a memoria di forma termoreattive (T-SMA) e sfruttando forme proprie dell'origami, quali la cosiddetta waterbomb, è in grado di cambiare la propria conformazione adattandosi alle condizioni ambientali (Fig. 9). Il processo può essere considerato ancora un sistema ibrido poiché, per ovviare a eventuali problemi derivanti dall'usura dei materiali, è stato impiegato anche un attuatore motorizzato elettrico, quale dispositivo ausiliario per limitare lo stress nell'elemento a base di SMA, realizzato con una lega nichel-titanio. L'impiego della stampa 4D ha consentito, al termine del processo di produzione, una diretta validazione del sistema mediante realizza-

zione di un mock-up sottoposto a test per simulare il comportamento in opera, verificando rapidamente l'efficacia della soluzione proposta e procedendo a una sua ottimizzazione (Fig. 10).

La predetta attività sperimentale ha rappresentato un punto di partenza per sistemi adattivi caratterizzati da una maggiore complessità, realizzati unicamente da materiali a memoria di forma tramite tecniche di stampa 4D. Al riguardo è paradigmatica l'esperienza di Yi e Kim (2021) che, ispirandosi a elementi naturali quali gli stomi dei cactus, hanno realizzato moduli dinamici per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche di edifici in climi aridi: il singolo elemento nelle ore più calde adotta una conformazione piatta che, schermando il passaggio della radiazione solare, limita il surriscaldamento degli ambienti interni; al contrario, con il progressivo abbassamento della temperatura ambientale, il pannello cambia la propria forma, incurvandosi, e favorisce il passaggio della radiazione solare (Fig. 11).

Per tale esperienza è stato adoperato un modulo composito a memoria di forma, in cui coesistono SMA e SMP. In particolare le fibre di nichel-titanio (SMA) sono state annegate in una matrice a base acrilica e poliuretana (SMP), consentendo una corretta integrazione tra le parti, capace di assicurare un'efficace trasmissione del calore e degli sforzi meccanici tra i due materiali impiegati (Fig. 12). Quest'ultima esperienza testimonia la rapida evoluzione delle tecniche di stampa 4D per la produzione di sistemi complessi modulari totalmente autonomi, ma resta uno dei pochi episodi isolati in quanto le applicazioni su larga scala sono ancora pressoché inesistenti.

Potenzialità e limiti della stampa 4D per le costruzioni | L'analisi delle potenzialità e dei limiti applicativi delle tecniche di stampa 4D per le costruzioni impongono dapprima uno sguardo più ampio sul tema. A testimonianza del sempre maggiore interesse mostrato dai settori manifatturieri per l'argomento, negli ultimi anni il valore del mercato globale della manifattura additiva attraverso stampaggio 4D ha visto una rapida crescita passando da 65 milioni di dollari del 2019 ai 90 milioni del 2021, con una stima per il 2030 pari a oltre 2 miliardi di dollari (Grand View Research, 2018).

L'interesse del settore manifatturiero deriva originariamente dalla possibilità di realizzare rapidamente prodotti in funzione delle specifiche richie-

ste dell'utilizzatore finale, ottenendo un notevole risparmio in termini di energia e materie prime necessarie alla produzione (Leist and Zhou, 2016; Ghi and Rossetti, 2016). Un esempio paradigmatico è rappresentato dall'ambito biomedicale dove le tecniche di stampa 4D hanno consentito una rapida produzione di protesi, stent e tessuti artificiali in grado di adattarsi al corpo del paziente e di raggiungere prestazioni nettamente superiori rispetto ai sistemi tradizionali (Aldawood, 2023).

Le possibili applicazioni della stampa 4D nel settore delle costruzioni, invece, rappresentano un ambito per la fabbricazione digitale ancora parzialmente inesplorato. Dall'analisi dell'attuale stato dell'arte sul tema si possono delineare i principali fattori che hanno favorito la diffusione del suddetto processo (Tab. 2). Tra questi, si evidenzia la possibilità di produrre elementi personalizzabili e programmabili in base alle specifiche condizioni finali di impiego (Vatanparast et alii, 2023), in grado di adattarsi alla variazione dei parametri ambientali (Saritha and Dhatreyi, 2021), garantendo le condizioni di benessere degli utenti (Yi et alii, 2020) e limitando i consumi energetici. Quest'ultimo aspetto, in particolare, è ottenibile tramite l'intelligenza primitiva insita nella materia del componente 4D, senza la necessità di sfruttare l'ausilio di sistemi complementari che andrebbero ad aggravare la posa in opera del sistema.

Inoltre la produzione di componenti auto-assemblanti, unita alla possibilità di discretizzare il manufatto in moduli riproducibili con comuni tecniche di manifattura additiva, velocizza la costruzione del manufatto finale e ne limita i costi di realizzazione (Tibbits, 2014; Leist and Zhou, 2016). Tale processo è ulteriormente ottimizzato grazie all'approccio tipico della fabbricazione digitale, quasi artigianale, in cui l'elemento finale è modellato nel dettaglio in ogni sua parte e in seguito prototipato in base alle specifiche caratteristiche richieste dal suo impiego con una ottimizzazione in corso d'opera, eliminando eventuali sprechi di risorse derivanti da possibili errori progettuali (Kuang et alii, 2018).

L'utilizzo su vasta scala nell'ambito delle costruzioni delle soluzioni realizzate con tecniche di stampaggio 4D, tuttavia, è limitato da diversi fattori (Tab. 2), due dei quali sono individuabili nella mancanza di una piena conoscenza delle prestazioni ottenibili dai componenti costruttivi durante la loro vita utile e la carenza di informazioni sulle

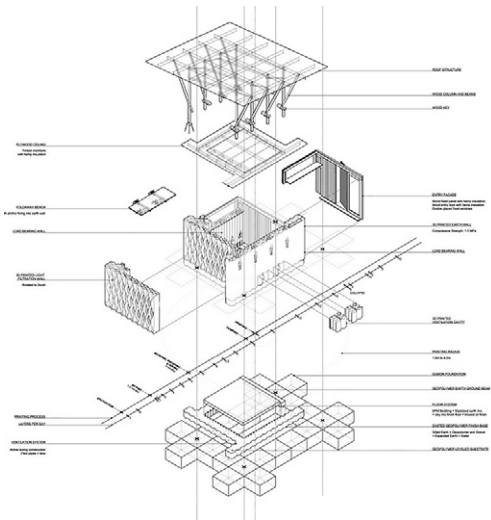


Fig. 3, 4 | DFAB House stands on the upper floor of the NEST building (credit: R. Keller); Digital fabrication techniques employed in the DFAB house (source: Graser, Kahlerlert and Hall, 2021).

Fig. 5 | Axonometric exploded view of the TOVA Pavilion (source: IAAC, 2022).

ricadute economiche dell'impiego di tali sistemi in casi studio reali.

Le applicazioni in ambito architettonico ed edilizio riportate in letteratura sono limitate a teorizzazioni e studi dimostrativi a scala laboratoriale, focalizzati unicamente sul rapporto tra l'elemento e gli stimoli che attivano il meccanismo di reazione; di conseguenza risulta impossibile effettuare una valutazione delle prestazioni tecnologiche e dell'impatto economico di tali sistemi sul lungo termine (Vatanparast et alii, 2023). Tale lacuna è ancor più rilevante nel caso di elementi stampati in 4D in sistemi di involucro edilizio adattivi e re-

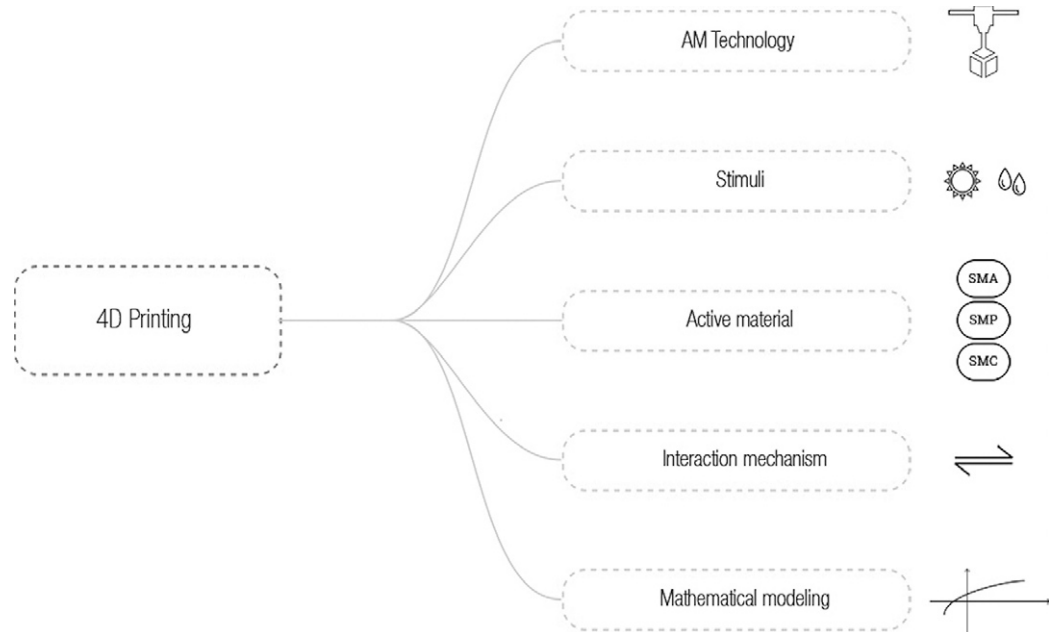


Fig. 6 | Main features of the 4D printing process (credit: the Authors, 2023).

sponsivi, in quanto la presenza degli agenti atmosferici esterni può influenzare l'efficienza dei meccanismi di reazione e minacciare l'integrità del sistema stesso (Yi and Kim, 2021). Infine, un ulteriore fattore limitante è rappresentato dalla forte personalizzazione nella scelta dei materiali a memoria di forma, il cui impiego è legato alla specificità del caso in oggetto, caratteristica che impedisce la costituzione di un database di buone pratiche da consultare e replicare in base ai requisiti del progetto da realizzare (Demoly et alii, 2021).

Conclusioni | Dall'analisi delle principali applicazioni e studi appare evidente come le tecniche di stampa 4D in architettura siano ancora ristrette a un campo prettamente sperimentale; il livello di conoscenza è tuttora limitato a esperienze applicative in sistemi costruttivi complessi (componenti modulari per facciate adattive) o in architetture effimere (le strutture Aguahoja). Di conseguenza un eventuale sviluppo della tecnica può derivare da nuove esperienze sperimentali, riguardanti aspetti non ancora affrontati (ad esempio, la durabilità dei componenti prodotti e la loro effettiva efficacia su sistemi a dimensioni reali) o da applicazioni in altri ambiti tecnologicamente avanzati, che potranno essere proposte anche nel settore delle costruzioni. A riguardo si segnala il contesto aerospaziale dove, per la realizzazione di strutture abitative in ambienti estremi, si stanno testando soluzioni a base di componenti auto assemblanti (Ekblaw, 2022); in tale ambito, quindi, l'impiego di prodotti stampati con tecnica 4D risponde ai requisiti richiesti e può essere considerato una valida alternativa ai sistemi elettromagnetici in uso (Ekblaw and Paradiso, 2019).

Infine nei prossimi anni la tecnica di stampa 4D sarà inevitabilmente rivoluzionata a seguito dell'introduzione di nuovi processi di manifattura additiva; tra questi si segnala l'innovazione tecnologica basata sull'introduzione di una maggiore capacità di movimento dell'ugello di stampa (cinque movimenti contro i tre tradizionali), che consente di depositare strati di materiale curvi più resistenti alle sollecitazioni meccaniche, rendendo

possibile la teorizzazione della cosiddetta stampa 5D (Anas et alii, 2022). In altri settori tecnologicamente avanzati è teorizzata per la prima volta la possibile unione delle suddette tecniche per confluire nell'inedita stampa 6D, in grado di realizzare elementi curvi ad alta resistenza meccanica e in grado di reagire agli stimoli esterni (Nida, Moses and Anandharamakrishnan, 2022). L'auspicio è che tali tecnologie 'sperimentali' possano trovare presto un'applicazione in architettura, colmando il tradizionale ritardo che il settore delle costruzioni registra verso l'innovazione di prodotto e di processo, per contribuire, alle diverse scale del costruito, a limitare l'impatto dell'azione antropica sul nostro pianeta.

The construction sector is a key component of the global economic market (Ghobakhloo, 2020). It is currently estimated to generate an investment volume of USD 9.7 trillion, a value set to increase substantially over the next decade to reach the USD 14 trillion mark by 2037 (Oxford Economics, 2023). Despite being one of the leading domains of the economic system, the construction sector has been only partially affected by the many innovations that have revolutionised the main fields of human activity in recent years (Fig. 1; Oke et alii, 2023). Due to numerous cultural, social and economic barriers, the complete transition to a new evolutionary reality, the so-called Construction 4.0 (El Jazzer et alii, 2020), is still a problematic process that is still in progress. The difficulties in the evolution of the construction sector go hand in hand with the growing sensitivity towards environmental and energy sustainability, which requires a paradigm shift with the adoption of now unavoidable ethical-economic strategies and actions, including judicious use of non-renewable resources, to counteract the effects of climate change (Gallego-Schmid et alii, 2020) and the fallout caused by recent war events (Hryhorovskyy et alii, 2022).

Against this backdrop, it is possible to identify numerous research trends affecting the construc-

Family	Name	Stimulus type	Material performance	Application field	Reference
T-SMA	Ni-Ti binary alloys	Temperature	High actuation strains, large, generated forces, high corrosion resistance	Biomedical	Kim et alii, 2023
T-SMA	Ni-Ti-based ternary alloys	Temperature	High actuation strains, large, generated forces, high corrosion resistance	Biomedical	Kim et alii, 2023
T-SMA	Cu-based alloys	Temperature	Less temperature hysteresis, better machinability, lower cost	Automobiles	Al-Humairi, 2019
M-SMA	Ni-Mn-Ga	Magnetic field	Quick response to the stimulus, energy efficiency	Aerospace, automotive, mobile robots	Kim et alii, 2023
M-SMA	Fe-Pd	Magnetic field	Quick response to the stimulus, energy efficiency	Aerospace, automotive, mobile robots	Kim et alii, 2023
M-SMA	Fe-Pt	Magnetic field	Quick response to the stimulus, energy efficiency	Aerospace, automotive, mobile robots	Kim et alii, 2023
SMP	PNB, PCL, SBR	Temperature	Great thermo-responsive shape-memory efficiency	Biomedical sensitive applications (e.g. stent)	Ansari et alii, 2018
SMP	β -CD-DETA, Polyurethanes	PH	Safety in medical applications	Biomedical applications	Strzelec, Sienkiewicz and Szmeczyk, 2020
SMP	Ether-based polyurethane, Poly(vinyl alcohol)	Water	No need to apply heat to obtain shape-memory conversion	Soft robots, micro-generators, smart building materials, textiles	Zhang et alii, 2022
SMP	Iron oxide (Fe ₃ O ₄)+SMP micro-sized Ni powder magnetite + poly(butyl acrylate) magnetite + polylactide magnetite + polycaprolactone	Magnetic field	Giant deformational effects, high elasticity, anisotropic elastic and swelling properties, quick response to magnetic fields, real-time controllable elastic properties	Sensor, trasnducer	Filipcsei et alii, 2007
SMP	boron nitride and carbon nanotube + epoxy-based SMP gold nanorods (AuNRs) into a poly(ϵ -caprolactone) matrix	Light	Low-costs light sources	Optical, photo-switchable electronic devices, dynamic photonic devices and photonic circuits, self-healing materials	Li, Schenning and Bunning, 2019

Tab. 1 | Main shape memory materials used for 4D printing (credit: the Authors, 2023).

tion process, particularly digitisation and the end product, with the emergence of all-new high-performance technical solutions (Ribeirinho et alii, 2020). In recent years, the way construction components are produced has changed, combining mass standardisation with customised production aimed at specific usage needs (Pasco, Lei and Aranas, 2022). This evolution has been made possible thanks to digital production technologies and new professional figures with transdisciplinary skills (Canestrino, 2021), also driven by the desire to achieve a new form of society centred on self-production (Russo and Moretti, 2020) – a production mode that is accessible to all, easily replicable and low-cost (Pone, 2022).

In the field of construction, among the technologies used in digital fabrication that have evolved

significantly in recent years is additive manufacturing (Li et alii, 2020; Fig. 2). This development has been possible both thanks to the progressive increase in the size of the printed element, which has allowed even the 'production' of entire houses (Sposito and Scalisi, 2017), and through the use of innovative, high-performance materials capable of responding to increasingly pressing environmental issues. Relevant examples are Italcementi's experiments on using cementitious composites for 3D printing or the Italian WASP with the return to natural materials such as raw earth and vegetable fibres (Di Dio et alii, 2022).

At the same time, building material sciences have been conducting research intending to impart an unprecedented dynamism to building components, giving the external envelope the skill to

adapt and be responsive to external stresses (Jang, Lee and Kim, 2013). To overcome the need to employ sensors and actuators, we have addressed nanoscale material design, creating a new category called 'smart materials' (Clifford et alii, 2017). Additive manufacturing has employed such materials for the production of modular elements inspired by the natural world (Paoletti, 2017; Tucci, 2017), and it has recently characterised them with a fourth dimension (4D) to employ them as dynamic and adaptive building elements through a customer-based approach (Haleem et alii, 2021). In this way, it is possible to obtain complex building components optimised for the particular conditions of use, capable of adapting to continuous environmental changes and with a high level of performance.

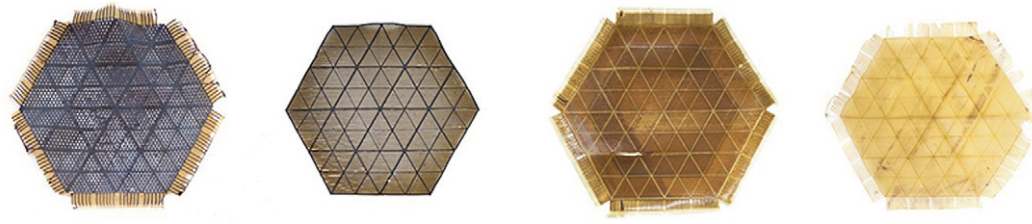


Fig. 7 | Shape memory biopolymer modules (credit: Mediated Matter Lab, 2019).

Fig. 8 | Example of a structure realised within the Aguahoja projects (credit: N. Oxman and Mediated Matter Lab, 2019).

Despite its enormous potential in the field of construction, 4D printing is today mainly used in more technologically advanced sectors, such as biomedical engineering (Agarwal et alii, 2021). Among the various limitations of a 4D application in the construction sector is the incompatibility between production techniques and the application scale. To overcome these limits, the concept of the module, understood as an elementary unit of a whole, repeatable and reproducible, plays a fundamental role: the characteristics of flexibility, adaptability, ease of transport and assembly inherent to the discretisation of construction elements into modular components, make it possible to overcome the limits of scalability that are still present (Minunno et alii, 2020).

However, despite a growing interest in the application of additive manufacturing techniques in the construction sector, the topic of the relationship between modularisation and 4D printing is still scarcely addressed in the literature, and the gradual transition between 3D building production and the use of 4D technology in modular constructions is only marginally analysed.

With this essay, the authors wish to contribute to the current debate on the application of digital fabrication techniques in architecture, analysing the relationship between modularisation in additive manufacturing processes and 4D printing in the construction sector, with a view to the progres-

sive clearance of these solutions for the realisation of adaptive and responsive buildings. To achieve the aim mentioned above, this essay first analyses the main research trends in the use of modular elements produced with additive manufacturing, then focuses on the main peculiarities of the 4D printing process and, lastly, examines the main factors that have facilitated or limited its use in the construction sector. This examination takes place through an analysis of the first 4D printing applications in architecture and construction, outlining possible future developments.

In particular, this work examines specific case studies that represent emblematic examples of how the process of modularisation allows the application of techniques typical of additive manufacturing in the field of construction and enables the introduction of the time element as a design parameter, overcoming the traditional static nature of the construction work. The aim is to establish a knowledge base for future research activities on the possible applications of modular systems realised by employing 4D printing, which can be used to realise adaptive building envelopes.

The module for digital fabrication in construction

Since the end of the first decade of the 21st century, there has been a progressive leap in the scale of the printed object, with the appearance of the first examples of dwellings made through digital fabrication techniques (Sposito and Scalisì, 2017), including those produced with an axial controlled extrusion process or with contour crafting, which consists of the distribution by layers of cement mixtures. Within a short period, starting from its presentation in 2009 at the University of Southern California, the latter technique has rapidly spread in the construction sector, enabling the construction of entire buildings (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

The main limitations of these early applications can be traced back to the poor scalability of the process, as the size of the realisable artefact depends on the range of the available equipment (Hager, Golonka and Putanowicz, 2016). Furthermore, the type of material used is often characterised by a highly impactful production cycle, in contrast to the now unavoidable demands for environmental sustainability (Heywood and Nicholas, 2023).

To cope with the first highlighted problem, the first experiments aimed at reducing the scale of printing equipment appeared. This included the first experiences using small-scale robotic operators who, following the discretisation of the work in modules, proceed in parallel with the construction of the building. These techniques have numerous advantages over traditional printing, including, for example, greater mobility, manoeuvrability and freedom in the choice of materials to be used since, with 'diffuse' construction, the dimensional and operational limitations of traditional printing equip-

ment are overcome. At the same time, one of the main limitations of this approach is that only vertical structures can be realised, whereas, for horizontal elements, piecemeal production and subsequent assembly must be adopted (Dörfler et alii, 2022).

The discretisation of the building into modules, to be realised in parallel, is also the basis of the experience that led to the construction of the DFAB House, developed and acknowledged by ETH Zurich. This construction constitutes one of the first examples of a habitable building realised solely employing digital fabrication techniques (Graser, Kahlert and Hall, 2021), and it is located within a structure called NEST (Fig. 3), where each individual housing unit constitutes an experimental habitable module, which is subject to compliance with local building regulations. The DFAB House, in particular, constitutes the portion of the building located on the building's top floor. Its realisation saw the combination of various digital fabrication techniques, and the bonding agent was the discretisation of the construction elements into modular components made on-site or at the project's partner companies (Graser, Kahlert and Hall, 2021; Fig. 4).

The concept of modularisation of the work to be realised is also present in research experiences related to additive manufacturing techniques focused on using sustainable materials. Among the latter are experiments using raw earth-based mixtures, natural elements characterised by a low environmental impact (Sposito and Scalisì, 2019). In this field of research, it is worth mentioning the work of the IAAC in Barcelona in collaboration with WASP, which in 2022 led to the realisation of TOVA, the first Spanish building to be entirely 3D printed using a mixture of earth, aloe, egg white and enzymes (Fig. 5). The experience gained by WASP in other previous projects, such as Gaia and Itaca, enabled the realisation of modular wall elements printed with material recovered less than 50 metres from the construction site, using the Crane printing technique (IAAC, 2022).

Although representative of the evolution of additive manufacturing techniques in the construction field, the aforementioned experimental experiences are still linked to methodologies typical of a static type of traditional architecture and are incapable of adapting to changing environmental conditions; in this regard, the desire to give dynamism to the manufactured product has favoured the development of 4D production techniques, thus introducing the temporal dimension.

4D printing as the last frontier of additive manufacturing

Although digital manufacturing is a process that dates back to the late 20th century, 4D printing was first theorised only in 2014. It was defined as an additive manufacturing technique that enables the production of elements that can change their shape or structure when subjected to external stimuli (Tibbitts, 2014). This first definition, introduced by researchers at MIT in Boston, included only components characterised by a dynamism of form. Still later on, other authors also had further types of reactions in this category, such as the variation of optical properties (Pei, 2014).

Compared to traditional 3D techniques, the innovation in this field lies in the material used, which is capable of reacting to external stimuli and

is therefore defined as smart (Addington and Schoedek, 2005). In particular, the innovative aspect lies in the reaction mechanism that is inherent in the material, without any deterioration of the material itself (Rastogi and Kandasubramanian, 2019), and that operates autonomously, thus making it possible to obtain elements defined as self-assembling (Khoo et alii, 2015).

An analysis of application experiences shows that the 4D printing process is characterised by the following steps (Fig. 6): the mathematical model design of the element, selection of the digital fabrication technique, selection of the smart material and, lastly, verification of the reaction mechanism (Momeni et alii, 2017). While 3D printing production techniques (Pei, Loh and Nam, 2020), such as Fused Deposition Modelling (FDM) or Fused Filament Modelling (FFM)¹, are used to manufacture the component, what characterises the illustrated process is the crucial role played by the design and material selection phases; only through rigorous mathematical modelling, it is possible to obtain the exact morphology of the component such as to trigger the adaptation processes to changing environmental conditions.

The choice of the smart material to be used determines the susceptibility to certain stimuli and the resulting reaction mechanism. Shape memory elements based on metal alloys (Shape Memory Alloys – SMA) or polymers (Shape Memory Polymers – SMP) are mainly used, as shown in Table 1. The alloys respond to electromagnetic or temperature change stimuli, and the most widely used in the construction industry, such as sensors and actuators, are based on Nickel-Titanium (Fiorito et alii, 2016; Kim et alii, 2023). Shape memory polymers are characterised by a high ductility of use that allows them to be used in composite or programmable structures, in which multiple shapes can be obtained as environmental conditions change (Ahmed et alii, 2021). Based on the reaction mechanism, SMPs can be distinguished into heat-responsive or Thermo-reactive (Ansari et alii, 2018), light-responsive or photoreactive (Li, Schenning and Bunning, 2019), magnetic energy (Filipcsei et alii, 2007) or water-responsive (Zhang et alii, 2022) materials.

The current applications of 4D printing are, however, limited to those technological sectors (robotics, aerospace, biomedical, etc.) that are more prone to experimenting with new techniques and where the use of shape memory materials is well-established (Strzelec, Sienkiewicz and Szmecnyk, 2020). In these fields, the introduction of 4D technology has allowed a further evolution of the technological level, favouring the use of customised solutions capable of adapting to multiple operation conditions. In recent years, these peculiarities have also been exploited in the construction field, becoming part of the broader process of transferring innovation from technologically advanced sectors to the construction industry, as was the case in the past for other cutting-edge solutions (Miodownik, 2015).

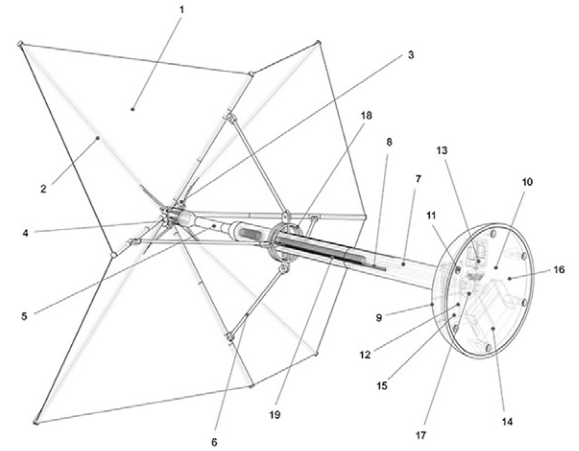
The module in 4D constructions | 4D printing has always been closely linked to the module con-

■ Parts

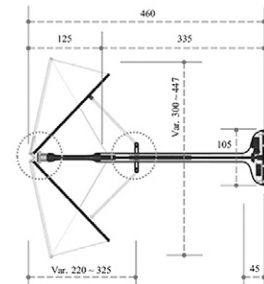
NO	Part descriptions	Dimensions (mm)
1	Origami panel (8ea)	W219XH219Xt 0.8
2	Panel hinge (8ea)	∅5.1Xt0.8
3	Panel joint (4ea)	L18.7X∅2.3Xt 2.0
4	Joint constraints (8ea)	L20XW8X∅2.3Xt 2.0
5	Panel fixing head (1ea)	L157X∅;20.0X∅;8.6
6	Driving arm (4ea)	L230XW2XH4X∅2.3
7	Body part (1ea)	L290X∅20.0Xt2.65
8	Slider slit (slit, 4ea)	L267XW3.0
9	Gear box cap (1ea)	∅113XH45Xt2.65
10	Back cover plate (1ea)	∅107Xt5.0
11	Screw groove (1ea)	∅;6Xt;2.5X∅;6Xt;2.5
12	Wi-Fi Micro controller (1ea)	ESP8266 Node MCU
13	Micro geared DC motor (1ea)	3V SZH-GNP104
14	Li-Po battery (1ea)	1300mAh TW103440
15	Motor-driver module (1ea)	1.5A/SZH-MDBL-010
16	Sensor (1ea)	DHT sensor
17	Bevel gear (1ea)	∅19.5, pitch 4.2
18	Ring (1ea)	∅;1.40X∅;2.13Xt2.0
19	Bevel gear worm (1ea)	∅9.2XL125, pitch 2.4

Note. L: length, t: thickness, ∅: Diameter, W: Width, H: Height, d: depth

Parts technical specifications



3D configuration



Longitudinal section

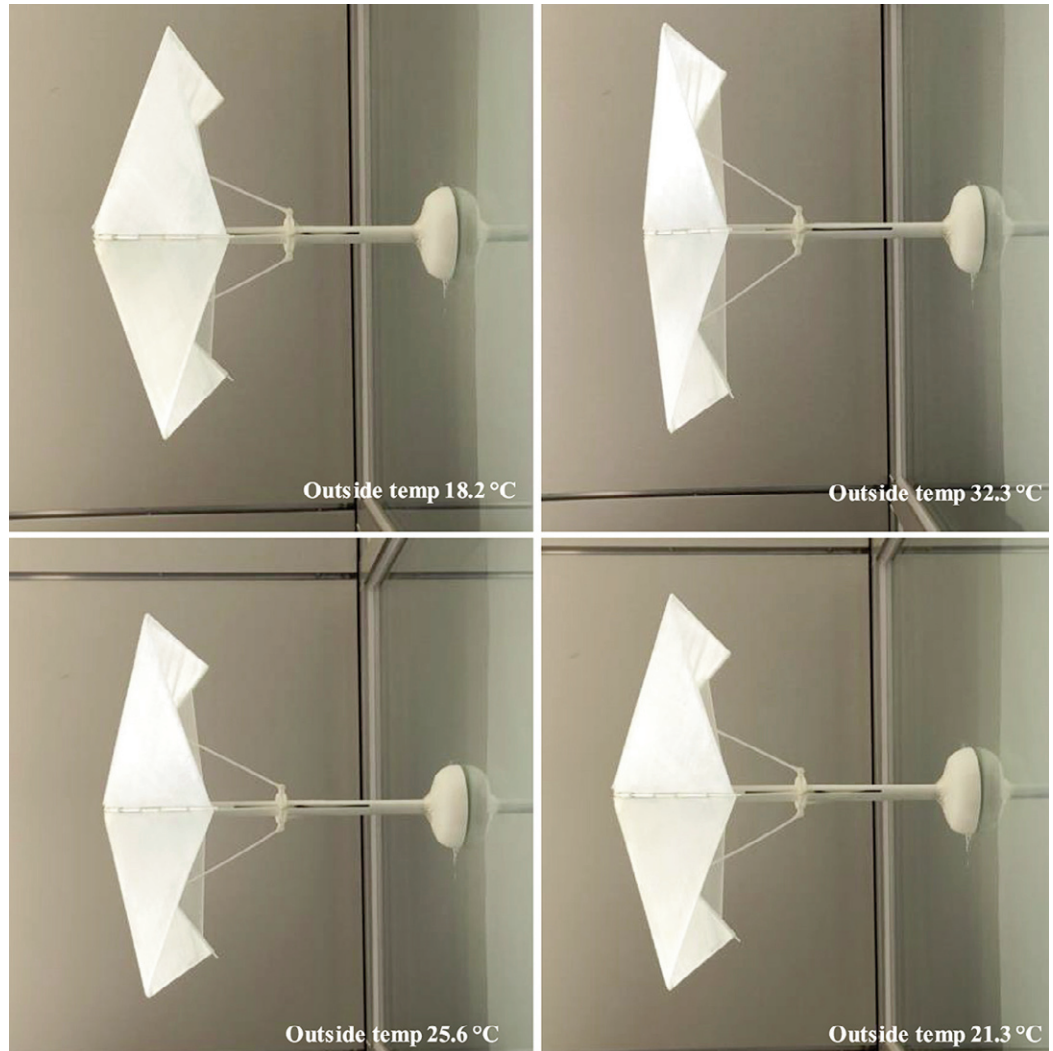


Fig. 9, 10 | SMA-based module design and experimental evaluation of shape change with temperature variation (source: Yi et alii, 2020; adapted by the Authors, 2023).

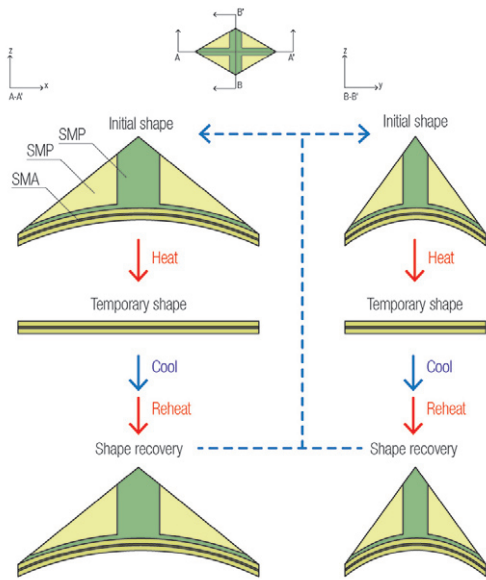
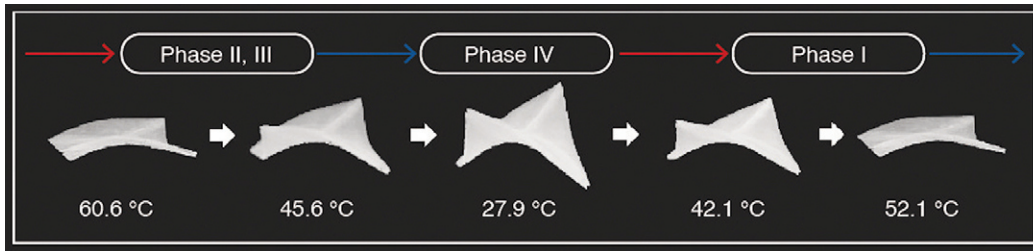


Fig. 11, 12 | Temperature-adaptive module configurations and SMP-SMA-based dynamic panel composition (source: Yi and Kim, 2021; adapted by the Authors, 2023).

cept since the first experiments. Even before introducing the concept in 2014 as a production technique based on the digital fabrication of self-assembling elements (Tibbits, 2014), Tibbits himself theorised in 2012 about the possibility of discretising architectures into modular elements capable of autonomously composing complex structures (Tibbits and Cheung, 2012). In addition to conceptualising new possible construction techniques that would lead to savings in terms of construction time and cost, this theorisation introduces the concept of ‘living material’, where the individual building component grows by evolving from its production.

The idea of living modular elements has been the basis of several research programs, including the Engineered Living Materials (ELM), launched in 2016 by the US government’s Defense Advanced Research Project Agency (DARPA, 2016) and aimed at the realisation of digitally fabricated materials of natural origin, capable of self-repairing and adapting to changing environmental conditions.

In the context mentioned above is the first pioneering work of the Mediated Matter Lab at MIT aimed at the production of dynamic modular elements employing bio-moulding techniques (Smith et alii, 2020); the latter are used for the realisation of tower structures called Aguahoja, in which the use of innovative biocompatible and adaptive materials coexists with the use of digital fabrication techniques (Fig. 7).

In particular, shape memory biopolymer materials based on carbohydrates of natural origin, such as chitosan, pectin and cellulose, were used

in these works, making them one of the first large-scale 4D printing applications² (Fig. 8). The fourth dimension manifests itself in two ways: not only in the dynamic capacity of the material, which, being made of shape memory biopolymers, reacts to changes in humidity by changing its stiffness, but also in the evolution of the artefact during the entire life of the installation. The latter is designed to degrade when exposed to rainwater, constituting a ‘living’ construction destined to disappear once its use is over (Tai et alii, 2018).

The ability to produce customisable and responsive elements has also favoured the use of 4D printing techniques for the realisation of envelope components capable of adapting to changing environmental conditions to reduce the building’s energy consumption (Alotaibi, 2015; Hosseini, Mohammadi and Guerra-Santin, 2005). This field of application was born as an evolution of traditional mobile solar shading systems, where the movement of individual modules is guaranteed by motorised mechanisms that contribute to the building’s energy consumption and require continuous maintenance for their proper functioning (Yi et alii, 2020).

By combining additive manufacturing and shape memory materials, 4D printing allows the production of modules capable of autonomous activation, avoiding the use of additional mechanical devices and thus simplifying the shielding system thanks to a ‘primitive intelligence’ inherent to the material (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021). This field was first characterised by hybrid systems, whose digital fabrication techniques were employed with traditional systems. In this regard, it is worth mentioning the experience of Hwang Yi (2021), who proposed a first application of mixed systems to realise adaptive building components for regulating solar radiation intake in indoor environments.

The experimentation mentioned above was characterised by the study and prototyping of a modular system based on 3D-printed polycarbonate and polylactic acid, which can change its conformation by adapting to environmental conditions (Fig. 9) through the application of elements made of Thermo-reactive Shape Memory Alloys (T-SMA) and by exploiting origami-like shapes, such as the so-called waterbomb. The process can still be regarded as a hybrid system since an electric motorised actuator was also used as an auxiliary device to limit the stress in the SMA-based element, made from a Nickel-Titanium alloy, to overcome any problems arising from material wear. At the end of the production process, 4D printing allowed a direct validation of the system by creating a mock-up subjected to tests to simulate its behaviour in situ, quickly verifying the effectiveness of the proposed solution and proceeding to its optimisation (Fig. 10).

The aforementioned experimental work represented a starting point for adaptive systems characterised by greater complexity, realised solely from shape memory materials employing 4D printing techniques. In this regard, the experience of Yi and Kim (2021) is paradigmatic. Inspired by natural elements such as the stomata of cacti, they have realised dynamic modules for optimising the energy performance of buildings in arid climates: during the hottest hours, the single element adopts a flat shape that shields the passage of solar radiation, limiting the overheating of the interior spaces; on the contrary, as the ambient temperature gradually drops, the panel changes its shape, curving, and favouring the passage of solar radiation (Fig. 11).

In this experience, a shape memory composite module was used, in which SMA and SMP coexist. In particular, the Nickel-Titanium fibres (SMA) were embedded in an acrylic and polyurethane-based matrix (SMP), allowing for a correct integration between the parts, capable of ensuring effective transmission of heat and mechanical stresses between the two materials used (Fig. 12). This last experience testifies to the rapid evolution of 4D printing techniques for the production of complex modular fully autonomous systems, but remains one of the few isolated episodes as large-scale applications are still almost non-existent.

Potentialities and limits of 4D printing for construction | Analysing the potential and application limits of 4D printing techniques for construction first requires a broader look at the topic. Testifying to the increasing interest shown by manufacturing sectors in the topic, the value of the global market for additive manufacturing through 4D printing has seen rapid growth in recent years, rising from USD 65 million in 2019 to USD 90 million in 2021, with an estimate for 2030 of more than USD 2 billion (Grand View Research, 2018).

The interest in the manufacturing sector originally stems from the possibility of rapidly producing products according to the end-users’ specific requirements, achieving significant savings in energy and raw materials needed for production (Leist and Zhou, 2016; Ghi and Rossetti, 2016). A paradigmatic example is the biomedical field, where 4D printing techniques have rapidly produced prostheses, stents and artificial tissues capable of adapting to the patient’s body and achieving significantly higher performance than traditional systems (Aldawood, 2023).

On the other hand, the possible applications of 4D printing in the construction sector represent a still partially unexplored field for digital fabrication. An analysis of the current state of the art on the subject reveals the main factors that have favoured the spread of this process (Tab. 2). These include the possibility of producing elements that can be customised and programmed according to the specific final conditions of use (Vatanparast et alii, 2023), capable of adapting to varying environmental parameters (Saritha and Dhatreyi, 2021), guaranteeing the well-being of users (Yi et alii, 2020) and limiting energy consumption. The latter aspect, in particular, is achievable through the primitive intelligence inherent in the 4D component’s matter, without the need to take advantage of complementary systems that would aggravate the system’s installation.

Moreover, coupled with the possibility of discretising the artefact into reproducible modules using standard additive manufacturing techniques, the production of self-assembling components speeds up the construction of the final artefact and limits its manufacturing costs (Tibbits, 2014; Leist and Zhou, 2016). This process is further optimised through the typical digital fabrication, quasi-craftsmanship approach, in which the final element is modelled in detail in every part and subsequently prototyped according to the specific characteristics required by its use with an in-process optimisation, eliminating any waste of resources resulting from possible design errors (Kuang et alii, 2018). The large-scale use of 4D moulding solutions in construction is, however, limited by several factors (Tab. 2), two of which are the lack of complete knowledge of the performance that construction components can achieve during their service life and the lack of information on the economic effects of using these systems in real case studies.

The applications in architecture and construction reported in the literature are limited to theorisations and demonstration studies on a laboratory scale, focused solely on the relationship between the element and the stimuli that activate the reaction mechanism. Consequently, it is impossible to assess the technological performance and economic impact of such systems in the long term (Vatanparast et alii, 2023). This shortcoming is even more relevant in the case of 4D-printed elements

in adaptive and responsive building envelope systems, as the external weathering may affect the reaction mechanisms' efficiency and threaten the system's integrity (Yi and Kim, 2021). Finally, a further limiting factor is the robust customisation in the choice of shape memory materials, which is linked to the specificity of the case in question. This characteristic prevents the constitution of a database of good practices from being consulted and replicated according to the project's requirements to be realised (Demoly et alii, 2021).

Conclusions | From the analysis of the main applications and studies, it is evident that 4D printing techniques in architecture are still restricted to a purely experimental field. The knowledge level is still limited to application experiences in complex building systems (modular components for adaptive façades) or ephemeral architectures (the Aguahoja structures). Consequently, a possible development of the technique may derive from new experimental experiences concerning aspects that have not yet been addressed (e.g. the durability of the components produced and their actual effectiveness on full-size systems) or from applications in other technologically advanced fields, which may also be proposed in the construction sector. In this regard, it is worth mentioning the aerospace context, where solutions based on self-assembling components are being tested for realising housing structures in extreme environments (Ekblaw, 2022). In this context, using

4D-printed products fulfils the requirements and can be considered a viable alternative to electromagnetic systems (Ekblaw and Paradiso, 2019).

Finally, 4D printing technology will inevitably be revolutionised in the coming years by introducing new additive manufacturing processes. Among these is the technological innovation based on the introduction of a greater movement capacity of the printing nozzle (five movements as opposed to the traditional three), which allows curved layers of material to be deposited that are more resistant to mechanical stress, making the theorisation of so-called 5D printing possible (Anas et alii, 2022). In other technologically advanced fields, it is theorised for the first time that the techniques mentioned above can be combined to form unprecedented 6D printing, which is capable of producing curved elements with high mechanical resistance and capable of reacting to external stimuli (Nida, Moses and Anandharamakrishnan, 2022). The hope is that these 'experimental' technologies may soon find an application in architecture, bridging the construction sector's traditional lag towards product and process innovation to contribute, at the various scales of the built environment, to limiting the impact of anthropic action on our planet.

Pros and cons	Typology	Key features	References
Pros	Building performance	Flexibly deformable, lightweight and sustainable kinetic building	Yi, 2021
Pros	Building performance	Improved building performance in terms of temperature control	Yi et alii, 2020
Pros	Building performance	Environmental flexibility	Saritha and Dhatreyi, 2021
Pros	Construction phase	Solving problems related to the use of motorized mechanisms (noise, energy consumption, frequent maintenance)	Leist and Zhou, 2016
Pros	Construction phase	Resource savings and reduced waste through design and management control tools that optimize manufacturing process accuracy	Saritha and Dhatreyi, 2021
Pros	Building performance	Programmable properties according to needs and environmental conditions	Vatanparast et alii, 2023
Cons	Building performance	Possible need for dual power supply (4D and electric motor)	Yi et alii, 2020
Cons	Building performance	Data still partial and incomplete, research limited to laboratory size, lack of in situ experimentation	Vatanparast et alii, 2023
Cons	Construction phase	Unknown economic feasibility on site	Yi and Kim, 2021
Cons	Construction phase	Unknown degradation time of smart material effect, need to do long-term analysis	Leist and Zhou, 2016
Cons	Building performance	Unknown resistance of the system to high environmental loads and accuracy of the shape change mechanism	Yi and Kim, 2021

Tab. 2 | Main limitations and potential of using 4D printing in the construction industry (credit: the Authors, 2023).

Acknowledgements

This paper is the result of a joint reflection of the authors. Notwithstanding this, the introductory paragraph, and the following ‘The module for digital fabrication in construction’, ‘4D printing as the last frontier of additive manufacturing’, ‘The module in 4D constructions’, ‘Potentialities and limits of 4D printing for construction’, ‘Conclusions’ are to be attributed to C. Battaglia and S. Polverino. R. Morbiducci coordinated and revised the final draft of the text.

Salvatore Polverino would like to thank the Italian National Operational Programme (PON) ‘Research and Innovation 2014-2020’ – Action IV.6 ‘Research Contracts on Green topics’ as RTD-A (Italian DM 1062/2021, CUP D31B21008360007 – project ‘Constructive systems based on two-dimensional materials for efficient and resilient behaviour of buildings’ SC 08/C1, SSD ICAR/10) at the Department of Architecture and Design, University of Genoa.

Notes

1) Fused Deposition Modelling (FDM), also known as Fused Filament Modelling (FFM), was developed at the end of the 1980s. This methodology works on an additive principle by deposition of superimposed layers. A filament of thermoplastic material (Nylon, ABS, PLA, PVA, PC, PETG) is unwound from a spool and then passed through an extrusion nozzle. The nozzle is heated to melt the material and can be guided in horizontal and vertical directions by a numerically controlled mechanism. Some machines allow composite materials to be moulded by depositing continuous carbon, glass or Kevlar fibres with the thermoplastic polymer.

2) The structures of the Aguahoja series, made of a biopolymer material based on water-reactive hydrogel, form 5-metre-high tower installations.

References

Addington, M. and Schodek, D. (2005), *Smart Materials and New Technologies – For the Architecture and Design Professions*, Architectural Press, Boston. [Online] Available at: bintian.files.wordpress.com/2013/01/smart-materials-new-technologies-for-the-architecture-design-professions.pdf [Accessed 16 October 2023].

Agarwal, T., Hann, S. Y., Chiesa, I., Cui, H., Celikkin, N., Micalizzi, S., Barbetta, A., Costantini, M., Esworthy, T., Zhang, L. G., De Maria, C. and Maiti, T. K. (2021), “4D printing in biomedical applications – Emerging trends and technologies”, in *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 9, issue 37, pp. 7608-7632. [Online] Available at: doi.org/10.1039/D1TB01335A [Accessed 16 October 2023].

Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H. and Khosla, A. (2021), “4D printing – Fundamentals, materials, applications and challenges”, in *Polymer*, vol. 228, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123926 [Accessed 16 October 2023].

Al-Humairi, S. N. S. (2019), “Cu-Based Shape Memory Alloys – Modified Structures and Their Related Properties”, in Al-Naib, U. M. B. (ed.), *Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition*, IntechOpen, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.5772/intechopen.86193 [Accessed 22 October 2023].

Aldawood, F. K. (2023), “A Comprehensive Review of 4D Printing – State of the Arts, Opportunities, and Challenges”, in *Actuators*, vol. 12, issue 3, article 101, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.3390/act12030101 [Accessed 22 October 2023].

Alotaibi, F. (2015), “The role of kinetic envelopes to improve energy performance in buildings”, in *Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 4, issue 3, pp. 149-153. [Online] Available at: doi.org/10.4172/2168-9717.1000149 [Accessed 16 October 2023].

Anas, S., Khan, M. Y., Rafey, M. and Faheem, K. (2022), “Concept of 5D printing technology and its applicability in the healthcare industry”, in *Materials Today | Proceedings*, vol. 56, part 4, pp. 1726-1732. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.391 [Accessed 16 October 2023].

Ansari, M., Golzar, M., Baghani, M. and Soleimani, M. (2018), “Shape memory characterization of poly(ϵ -caprolactone) (PCL)/polyurethane (PU) in combined torsion-tension loading with potential applications in cardiovascular stent”, in *Polymer Testing*, vol. 68, pp. 424-432. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.032 [Accessed 16 October 2023].

Canestrino, G. (2021), “Dialettica analogico-digitale nel progetto di architettura – Per rinnovate ipotesi di metodo | Analogue-digital dialectics in architectural design – Towards renewed hypotheses of method”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 56-67. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1052021 [Accessed 16 October 2023].

Clifford, D. T., Zupan, R. J., Brigham, J. C., Beblow, R. V., Whittock, M. and Davis, N. (2017), “Application of the dynamic characteristics of shape-memory polymers to climate adaptive building facades”, in *Proceedings of the 12th Conference of Advanced Building Skins, 2-3 October 2017, Bern, Switzerland*, pp. 171-178. [Online] Available at: durham-repository.worktribe.com/output/1146351 [Accessed 16 October 2023].

DARPA (2016), “Living Structural Materials Could Open New Horizons for Engineers and Architects”, in *darpa.mil*, 08/05/2016. [Online] Available at: darpa.mil/news-events/2016-08-05 [Accessed 16 October 2023].

Demoly, F., Dunn, M. L., Wood, K. L., Qi, H. J. and Andre, J. C. (2021), “The status, barriers, challenges, and future in design for 4D printing”, in *Materials & Design*, vol. 212, article 110193, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110193 [Accessed 16 October 2023].

Di Dio, S., Inzerillo, B., Monterosso, F. and Russo, D. (2022), “Design e transizione digitale – Nuove sfide design-driven per l’innovazione tecno-sociale | Design and digital transition – New design-driven challenges for techno-social innovation”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 212-225. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12192022 [Accessed 16 October 2023].

Dörfler, K., Dielemans, G., Lachmayer, L., Recker, T., Raatz, A., Lowke, D. and Gerke, M. (2022), “Additive Manufacturing using mobile robots – Opportunities and challenges for building construction”, in *Cement and Concrete Research*, vol. 158, article 106772, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106772 [Accessed 16 October 2023].

Ekblaw, A. (2022), “Space Architecture in Microgravity – TESSERAE Project for Large Scale Space Structures”, in *Technology | Architecture + Design*, vol. 6, issue 2, pp. 146-148. [Online] Available at: doi.org/10.1080/24751448.2022.2116225 [Accessed 16 October 2023].

Ekblaw, A. and Paradiso, J. (2019), “Self-Assembling Space Habitats – TESSERAE design and mission architecture”, in *2019 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1109/AERO.2019.8742122 [Accessed 16 October 2023].

El Jazzer, M., Urban, H., Schranz, C. and Nassereddine, H. (2020), “Construction 4.0 – A Roadmap to Shaping the Future of Construction”, in Tateyama, T., Ishii, K. and Inoue, F. (eds), *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020), Kitakyushu, Japan, October 27-28, 2020*, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), pp. 1314-1321. [Online] Available at: doi.org/10.22260/ISARC2020/0180 [Accessed 16 October 2023].

Filipceci, G., Csetneki, I., Szilágyi, A. and Zrinyi, M. (2007), “Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites”, in Gong, B., Sanford, A. R. and Ferguson, J. S. (eds), *Oligomers – Polymer Composites – Molecular Imprinting*, Advances in Polymer Science series, vol. 206, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 137-180. [Online] Available at: doi.org/10.1007/12_2006_104 [Accessed 16 October 2023].

Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G. and Ranzi, G. (2016), “Shape morphing solar shadings – A review”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 863-884. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086 [Accessed 16 October 2023].

Gallego-Schmid, A., Chen, H.-M., Sharmina, M. and Mendoza, J. M. F. (2020), “Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, article 121115, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121115 [Accessed 16 October 2023].

Ghi, A. and Rossetti, F. (2016), “4D Printing – An Emerging Technology in Manufacturing?”, in Caporarello, L., Cesaroni, F., Giesecke, R. and Missikoff, M. (eds), *Digitally Supported Innovation*, Lecture Notes in Information Systems and Organisation, vol. 18, Springer, Cham, pp. 171-178. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-40265-9_12 [Accessed 23 October 2023].

Ghobakhloo, M. (2020), “Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, article 119869, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869 [Accessed 16 October 2023].

Grand View Research (2018), *4D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report by Material (Programmable Carbon Fiber, Programmable Wood, Programmable Textiles), By End-Use, By Region, And Segment Forecasts, 2018-2025*. [Online] Available at: [grandviewresearch.com/industry-analysis/4d-printing-market/toc](https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/4d-printing-market/toc) [Accessed 23 October 2023].

Graser, K., Kahlert, A. and Hall, D. M. (2021), “DFAB HOUSE – Implications of a building-scale demonstrator for adoption of digital fabrication in AEC”, in *Construction Management and Economics*, vol. 39, issue 10, pp. 853-873. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01446193.2021.1988667 [Accessed 16 October 2023].

Hager, I., Golonka, A. and Putanowicz, R. (2016), “3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?”, in *Procedia Engineering*, vol. 151, pp. 292-299. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357 [Accessed 16 October 2023].

Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P. and Suman, R. (2021), “Significant roles of 4D printing using smart materials in the field of manufacturing”, in *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, issue 4, pp. 301-311. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.05.001 [Accessed 16 October 2023].

Heywood, K. and Nicholas, P. (2023), “Sustainability and 3D concrete printing – Identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts”, in *Architectural Intelligence*, vol. 2, article 12, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s44223-023-00030-3 [Accessed 16 October 2023].

Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V. and Hryhorovskiy, A. (2022), “A BIM-Based Method for Structural Stability Assessment and Emergency Repairs of Large-Panel Buildings Damaged by Military Actions and Explosions – Evidence from Ukraine”, in *Buildings*, vol. 12, issue 11, article 1817, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12111817 [Accessed 16 October 2023].

Hosseini, S. M., Mohammadi, M. and Guerra-Santin, O. (2019), “Interactive kinetic façade – Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant’s positions by 2D and 3D shape changes”, in *Building and Environment*, vol. 165, article 106396, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396 [Accessed 16 October 2023].

IAAC (2022), *Open Thesis Fabrication – 3D Printing in Architecture*. [Online] Available at: issuu.com/3dpa20212022/docs/2122_rs_booklet_template_otf_online [Accessed 16 October 2023].

Jang, S.-Y., Lee, S. and Kim, S.-A. (2013), “Collaborative Responsive Façade Design Using Sensor and Actuator Network”, in Luo, Y. (ed.), *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8091, Springer, Berlin-Heidelberg, pp. 11-18. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-642-40840-3_2 [Accessed 16 October 2023].

Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang,

- S., An, J., Leong, K. F. and Yeong, W. Y. (2015), "3D printing of smart materials – A review on recent progresses in 4D printing", in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, issue 3, pp. 103-122. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054 [Accessed 16 October 2023].
- Kim, M.-S., Heo, J.-K., Rodrigue, H., Lee, H.-T., Pané, S., Han, M.-W. and Ahn, S.-H. (2023), "Shape Memory Alloy (SMA) Actuators – The Role of Material, Form, and Scaling Effects", in *Advanced Materials*, vol. 35, issue 33, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adma.202208517 [Accessed 16 October 2023].
- Kuang, X., Chen, K., Dunn, C. K., Wu, J., Li, V. C. F. and Qi, H. J. (2018), "3D printing of highly stretchable, shape-memory, and self-healing elastomer toward novel 4D printing", in *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 10, issue 8, pp. 7381-7388. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acsami.7b18265 [Accessed 16 October 2023].
- Leist, S. K. and Zhou, J. (2016), "Current status of 4D printing technology and the potential of light-reactive smart materials as 4D printable materials", in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, issue 4, pp. 249-262. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17452759.2016.1198630 [Accessed 16 October 2023].
- Li, Q., Schenning, A. P. H. J. and Bunning, T. J. (2019), "Light-Responsive Smart Soft Matter Technologies", in *Advanced Optical Materials*, vol. 7, issue 16, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adom.201901160 [Accessed 16 October 2023].
- Li, S., Yuan, S., Zhu, J., Wang, C., Li, J. and Zhang, W. (2020), "Additive manufacturing-driven design optimization – Building direction and structural topology", in *Additive Manufacturing*, vol. 36, article 101406, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2020.101406 [Accessed 16 October 2023].
- McKinsey Global Institute (2017), *Reinventing Construction – A route to higher productivity*. [Online] Available at: mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Momeni, F., Hassani, N. S. M., Liu, X. and Ni, J. (2017), "A review of 4D printing", in *Materials & Design*, vol. 122, pp. 42-79. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068 [Accessed 16 October 2023].
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M. and Gruner, R. L. (2020), "Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices – A circular economy case study of a modular building", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 160, article 104855, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855 [Accessed 16 October 2023].
- Miodownik, M. (2015), *La sostanza delle cose – Storie incredibili dei materiali meravigliosi di cui è fatto il mondo*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Nida, S., Moses, J. A. and Anandharamkrishnan, C. (2022), "Emerging applications of 5D and 6D printing in the food industry", in *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 10, article 100392, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100392 [Accessed 16 October 2023].
- Oke, A. E., Aliu, J., Fadamiro, P. O., Akanni, P. O. and Stephen, S. S. (2023), "Attaining digital transformation in construction – An appraisal of the awareness and usage of automation techniques", in *Journal of Building Engineering*, vol. 67, article 105968, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2023.105968 [Accessed 16 October 2023].
- Oxford Economics (2023), *Global Construction Futures – A global forecast for the construction industry to 2037*. [Online] Available at: oxfordeconomics.com/resource/global-construction-futures/ [Accessed 30 October 2023].
- Paoletti, I. (2017), "Involucri responsivi – Sperimentazioni con modelli a comportamento naturale | Responsive Envelopes – Experimentations by natural Role Models", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 213-218. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2282017 [Accessed 16 October 2023].
- Paolini, A., Kollmannsberger, S. and Rank, E. (2019), "Additive manufacturing in construction – A review on processes, applications, and digital planning methods", in *Additive Manufacturing*, vol. 30, article 100894, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894 [Accessed 16 October 2023].
- Pasco, J., Lei, Z. and Aranas, C. Jr. (2022), "Additive Manufacturing in Off-Site Construction – Review and Future Directions", in *Buildings*, vol. 12, article 53, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12010053 [Accessed 16 October 2023].
- Pei, E. (2014), "4D printing – Revolution or fad?", in *Assembly Automation*, vol. 34, issue 2, pp. 123-127. [Online] Available at: doi.org/10.1108/AA-02-2014-014 [Accessed 16 October 2023].
- Pei, E., Loh, G. H. and Nam, S. (2020), "Concepts and terminologies in 4D printing", in *Applied Sciences*, vol. 10, issue 13, article 4443, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app10134443 [Accessed 16 October 2023].
- Perriccioli, M., Ruggiero, R. and Salka, M. (2021), "Ecologia e tecnologie digitali – L'architettura alla piccola scala come luogo di connessioni | Ecology and digital technologies – Small-scale architecture as a place of connections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 36-45. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1032021 [Accessed 16 October 2023].
- Pone, S. (2022), "Maker – Il ritorno dei costruttori – Una possibile transizione digitale per l'Architettura | Maker – The return of the builders – A possible digital transition for Architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 14-23. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212022 [Accessed 16 October 2023].
- Rastogi, P. and Kandasubramanian, B. (2019), "Breakthrough in the printing tactics for stimuli-responsive materials – 4D printing", in *Chemical Engineering Journal*, vol. 366, pp. 264-304. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.085 [Accessed 16 October 2023].
- Ribeirinho, M. J., Mischke, J., Strube, G., Sjödin, E., Blanco, J. L., Palter, R., Biörck, J., Rockhill, D. and Andersson, T. (2020), *The next normal in construction – How disruption is reshaping the world's largest ecosystem*, McKinsey & Company. [Online] Available at: dln.jaipuria.ac.in:8080/jspui/bitstream/123456789/14341/1/The-next-normal-in-construction.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Russo, D. and Moretti, M. (2020), "Shamballa, il Paradiso può attendere – Come la stampa 3D sostiene il futuro | Shamballa, Heaven can wait – How 3D printing will sustain the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 32-43. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/832020 [Accessed 16 October 2023].
- Saritha, D. and Dhatreyi, B. (2021), "A concise review on 4D printing technology", in *Materials Today | Proceedings*, vol. 46, part 1, pp. 692-695. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.016 [Accessed 16 October 2023].
- Smith, R. S. H., Bader, C., Sharma, S., Kolb, D., Tang, T.-C., Hosny, A., Moser, F., Weaver, J. C., Voigt, C. A. and Oxman, N. (2020), "Hybrid Living Materials – Digital Design and Fabrication of 3D Multimaterial Structures with Programmable Biohybrid Surfaces", in *Advanced Functional Materials*, vol. 30, issue 7, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adfm.201907401 [Accessed 16 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2019), "Innovazione dei materiali naturali – Terra e nanotubi di argilla per una sfida sostenibile | Natural material innovation – Earth and halloysite nanoclay for a sustainable challenge", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 59-72. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/572019 [Accessed 16 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2017), "Strumenti e materiali per la fabbricazione digitale in architettura | Instruments and materials for digital manufacturing in architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 1, pp. 143-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1222017 [Accessed 16 October 2023].
- Strzelec, K., Sienkiewicz, N. and Szmechtyk, T. (2020), "Classification of Shape-Memory Polymers, Polymer Blends, and Composites", in Parameswaranpillai, J., Siengchin, S., George, J. and Jose, S. (eds), *Shape Memory Polymers, Blends and Composites*, Advanced Structured Materials series, vol. 115, Springer, Singapore, pp. 21-52. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2_2 [Accessed 16 October 2023].
- Tai, Y.-J. T., Bader, C., Ling, A. S., Disset, J., Darweesh, B., Duro-Royo, J., van Zak, J., Hogan, N. and Oxman, N. (2018), "Designing (for) Decay – Parametric Material Distribution for Hierarchical Dissociation of Water-based Biopolymer Composites", in Mueller, C. and Adriaenssens, S. (eds), *Proceedings of the IASS Symposium 2018 – Creative in Structural Design, July 16-20, 2018, MIT, Boston*, pp. 1-8. [Online] Available at: oxman.com/files/85c33ef4-ca38-4a13-919a-4ca1df71bf25/Designing-(for)-Decay.-Parametric-Material-Distribution-for-Hierarchical-Dissociation-of-Water-based-Biopolymer-Composites-(2018).pdf [Accessed 16 October 2023].
- Tibbits, S. (2014), "4D printing – Multi-material shape change", in *Architectural Design*, vol. 84, issue 1, pp. 116-121. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ad.1710 [Accessed 16 October 2023].
- Tibbits, S. and Cheung, K. (2012), "Programmable materials for architectural assembly and automation", in *Assembly Automation*, vol. 32, issue 3, pp. 216-225. [Online] Available at: doi.org/10.1108/01445151211244348 [Accessed 16 October 2023].
- Tucci, F. (2017), "Paradigmi della Natura per Progettare Involucri architettonici | Nature's Paradigms for Designing Architectural Envelopes", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 2, pp. 47-54. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/262017 [Accessed 16 October 2023].
- Vatanparast, S., Boschetto, A., Bottini, L. and Gaudenzi, P. (2023), "New Trends in 4D Printing – A Critical Review", in *Applied Sciences*, vol. 13, issue 13, article 7744, pp. 1-37. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app13137744 [Accessed 16 October 2023].
- Yi, H. (2021), "4D-printed parametric façade in architecture – Prototyping a self-shaping skin using programmable two-way shape memory composite (TWSMC)", in *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, issue 10, pp. 4132-4152. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1108/ECAM-05-2021-0428 [Accessed 16 October 2023].
- Yi, H. and Kim, Y. (2021), "Prototyping of 4D-printed self-shaping building skin in architecture – Design, fabrication, and investigation of a two-way shape memory composite (TWSMC) façade panel", in *Journal of Building Engineering*, vol. 43, article 103076, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2021.103076 [Accessed 16 October 2023].
- Yi, H., Kim, D., Kim, Y., Kim, D., Koh, J. and Kim, M. (2020), "3D-Printed Attachable Kinetic Shading Device with Alternate Actuation – Use of Shape-Memory Alloy (SMA) for Climate-Adaptive Responsive Architecture", in *Automation in Construction*, vol. 114, article 103151, pp. 103-151. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103151 [Accessed 16 October 2023].
- Zhang, Y., Zhang, C., Wang, R., Tan, W., Gu, Y., Yu, X., Zhu, L. and Liu, L. (2022), "Development and challenges of smart actuators based on water-responsive materials", in *Soft Matter*, vol. 18, issue 31, pp. 5725-5741. [Online] Available at: doi.org/10.1039/D2SM00519K [Accessed 16 October 2023].