

## ARTICLE INFO

Received 17 September 2023  
Revised 13 October 2023  
Accepted 22 October 2023  
Published 31 December 2023

## PATTERN MODULARI NEL DESIGN IGROSCOPICO CON STAMPA 4D

Forma e programmazione del materiale

## MODULAR PATTERNS IN HYGROSCOPIC 4D PRINTING DESIGN

Form and programming and the material

David Correa, Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia

### ABSTRACT

La ricerca illustra l'impiego della stampa 4D (4DP) per la creazione di attuatori di ispirazione biologica e igro-responsivi con Compositi Polimerici di Legno (WPC), evidenziando come il controllo della cinematica attraverso la programmazione dei materiali e dei parametri di stampa consenta di ottenere meccanismi dinamici di cambiamento di forma in risposta a fattori ambientali. Nella 4DP le configurazioni geometriche degli oggetti stampati dipendono non solo dai materiali, ma anche dalla loro combinazione, dal tempo e dagli stimoli ambientali, introducendo il concetto di architettura del materiale e ridefinendo il rapporto tra forma e materia. In questo articolo viene discussa la relazione tra gli attuatori responsivi 4DP WPC, l'architettura del materiale e le deformazioni igroscopiche, evidenziando il ruolo dei modelli modulari nella definizione della reazione allo stimolo e della configurazione finale dell'oggetto.

4D Printing (4DP) can be used to create bio-inspired, hygro-responsive actuators using Wood Polymer Composites (WPCs). The research emphasises the role of precise control of kinematics through material programming and printing parameters to achieve dynamic shape-change mechanisms in response to environmental factors. In 4DP, the geometric configurations of printed objects depend not only on the materials but also on their combination, time, and environmental stimuli, leading to the concept of material architecture: in the context of 4DP, the relationship between form and matter is, therefore, redefined. In this paper, the relationship between the responsive WPCs 4DP actuators with their material architecture and their hygroscopic deformations is discussed, highlighting the role of the modular patterns in the definition of the reaction to the stimulus and the final configuration of the object.

### KEYWORDS

soluzioni bio-ispirate, cambiamento di forma, programmazione del materiale, compositi a base di legno, modelli modulari

bio-inspired solutions, shape change, material programming, wood-based composites, modular patterns

**David Correa**, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture of the University of Waterloo (Canada) and a Design Partner at LLLab Architects. His research looks at biological structures and processes as a source of insight for the development of new fabrication processes and advanced materials. E-mail: david.correa@uwaterloo.ca

**Fabio Bianconi**, Engineer and PhD, is an Associate Professor at the Department of Civil and Environmental Engineering of Perugia (Italy). He carries out his research in representation, landscape simulation, design and architectural survey. E-mail: fabio.bianconi@unipg.it

**Marco Filippucci**, Engineer and PhD, is a Researcher at the Department of Civil and Environmental Engineering of Perugia (Italy) and his research focuses on the image of the city, digital techniques of representation, and architectural and landscape drawing. E-mail: marco.filippucci@unipg.it

**Giulia Pelliccia** is an Engineer and PhD with a Thesis titled 'Hygroscopic indoor design – Morphological and material programming of responsive wooden bilayers and 4D printing shape-change mechanisms'. E-mail: giulia.pelliccia@outlook.it



Gli studi bio-ispirati guardano alla natura per trovare soluzioni tecniche a una moltitudine di temi di ricerca, dall'architettura alla soft robotics e alla medicina (Poppinga et alii, 2020), con un'attenzione anche alle tecnologie di fabbricazione che possono supportare la traduzione di questi principi bio-ispirati in applicazioni funzionali. La stampa 3D (3DP) è sempre più utilizzata per questi scopi e, grazie a un'ampia varietà di applicazioni (Khosravani e Reinicke, 2020) e alla sua personalizzazione, si presta anche a essere utilizzata in modi non convenzionali. A differenza dei normali processi industriali di fusione, estrusione o fresatura, la fabbricazione di materiali di ispirazione biologica richiede un'attenta coreografia delle architetture dei materiali su più scale di lunghezza. Attraverso la 3DP è possibile fabbricare Materiali Compositi Funzionalmente Graduati (Functionally Graded Composite Materials – FGCM), ovvero materiali ingegnerizzati avanzati che presentano una variazione graduale e controllata della composizione, della struttura o delle proprietà nel loro volume (Udupa, Rao and Gangadharan, 2014). Inoltre la 3DP ha mostrato un potenziale nello sviluppo di materiali intelligenti, le cui proprietà cambiano in reazione a stimoli esterni come luce, calore, solventi, corrente elettrica o acqua (Addington and Schodek, 2005; Tibbits, 2013; Mustapha and Metwalli, 2021).

La 3DP basata sulla tecnologia Fused Deposition Modelling (FDM), che è uno dei metodi più utilizzati grazie ai bassi costi e alla possibilità di personalizzazione (Ni et alii, 2017), utilizza un filamento continuo di un polimero termoplastico che può essere ripetutamente fuso quando viene riscaldato e solidificato quando viene raffreddato. La FDM consente un controllo preciso dei parametri di stampa (temperatura, velocità, estrusione e altezza) e dei modelli di organizzazione del percorso di stampa (shell, infill e direzione di stampa) che portano alla definizione di caratteristiche meccaniche dipendenti dalla direzione nel pezzo risultante (Ahn et alii, 2002).

Definendo la relazione delle caratteristiche di organizzazione del materiale tra gli strati il processo FDM consente di progettare direttamente la meso-architettura del materiale (Tahouni et alii, 2021), una caratteristica unica che si è rivelata particolarmente adatta allo sviluppo di compositi 3DP con uno specifico comportamento di cambiamento di forma 4D, ottenuto grazie alla programmazione dell'architettura del materiale (Correa, 2022). Tali cinematismi di cambiamento di forma, essendo dipendenti dal tempo, prendono il nome di stampa 4D (4DP), poiché viene considerata la quarta dimensione del tempo necessaria per la trasformazione (Tibbits, 2013) che può avvenire in risposta a molteplici stimoli come il calore (Ge et alii, 2014), le variazioni di umidità relativa nell'aria (Le Duigou et alii, 2019; Tomec et alii, 2021) o il contatto diretto con l'acqua per immersione (Shiblee et alii, 2019; Le Duigou et alii, 2020).

La progettazione degli attuatori 4DP avviene attraverso la reiterazione di moduli di organizzazione dei materiali che funzionano come blocchi di costruzione a diverse scale gerarchiche e sono responsabili del comportamento 4DP risultante in risposta a uno stimolo target (Le Duigou and Correa, 2022). Tali moduli si basano sulla definizione delle linee del percorso di stampa che avviene creando dei pattern dipendenti dalla direzione i quali carat-

terizzano l'architettura del materiale del composito, ne dettano le proprietà meccaniche e regolano la reazione passiva alle variazioni di umidità.

Il disegno di questi pattern viene utilizzato per progettare la meso-scala della struttura a doppio strato, definendo due strati funzionali principali, con pattern differenziati e altamente anisotropi, in relazione reciproca: uno strato di espansione sensibile all'umidità e uno strato di vincolo non responsivo. La struttura a doppio strato si basa sulle relazioni note per i bi-metalli sviluppate da Timoshenko (1925), considerando uno strato di espansione igroscopico, che è responsabile delle variazioni dimensionali dei compositi assorbendo e rilasciando l'umidità, e uno strato di vincolo, che ha invece coefficienti igroscopici molto più bassi. Le variazioni di forma 4D sono quindi progettate definendo geometricamente le proprietà dipendenti dalla direzione per ogni strato, in funzione delle quali l'espansione igroscopica produce una forma predeterminata col passare del tempo (Correa and Menges, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Le Duigou et alii, 2016; Vailati et alii, 2018; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021).

Attraverso il metodo 4DP si crea una connessione unica tra materia e forma che permette di innovare la precedente ricerca sui compositi laminati a doppio strato. Le proprietà dei materiali derivano da forme modulari discretizzate (i percorsi di stampa) e organizzate in maniera specifica su varie meso-scale per ottenere grandi variazioni di forma 4DP su macro-scala. Secondo la definizione di Aristotele di 'ilemorfismo' ogni oggetto fisico è composto da materia e forma: la forma definisce il modo in cui una sostanza è organizzata o strutturata e conferisce alla materia la sua identità; materia e forma devono essere considerate un tutt'uno, non sono due oggetti indipendenti o due parti indipendenti di un tutto (Witt, 1987).

Pertanto, lavorando all'interno del quadro concettuale di Aristotele, la possibilità di ottenere una forma precisa è sempre insita nella materia; tuttavia con l'evoluzione di tecnologie e materiali sono stati introdotti altri fattori e la 4DP definisce un nuovo rapporto tra forma e materia. Le configurazioni geometriche degli oggetti responsivi stampati dipendono non solo dai materiali stessi, ma anche dall'organizzazione gerarchica e formale dell'architettura del materiale che può essere progettata con precisione. Sebbene sia difficile affermare cosa intendesse esattamente Aristotele riguardo alla relazione tra materia e forma è improbabile che lo stesso abbia considerato la natura attiva dei compositi 4DP, nei quali la forma cambia costantemente in relazione alle condizioni ambientali e al passare del tempo.

Nella progettazione di compositi 4DP i percorsi di stampa possono essere considerati come dei blocchi di costruzione utilizzati per definire un linguaggio dei materiali che, per essere tale, richiede modelli e regole in grado di mantenere l'ordine e di supportare la creazione di significato. Nella 4DP il significato può essere interpretato come la chiarezza dell'intento progettuale che si traduce in caratteristiche prestazionali misurabili, come la definizione precisa del cambiamento di forma, l'ampiezza della curvatura o il tempo di risposta più rapido al cambiamento di forma. I pattern all'interno dell'architettura del materiale sono quindi gli elementi essenziali che costituiscono quel linguaggio che, attraverso i vari modelli geometri-

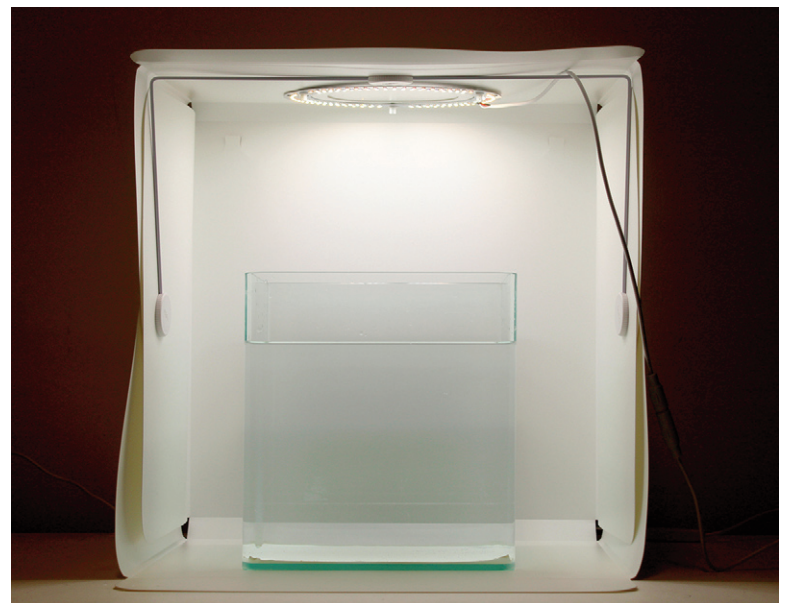
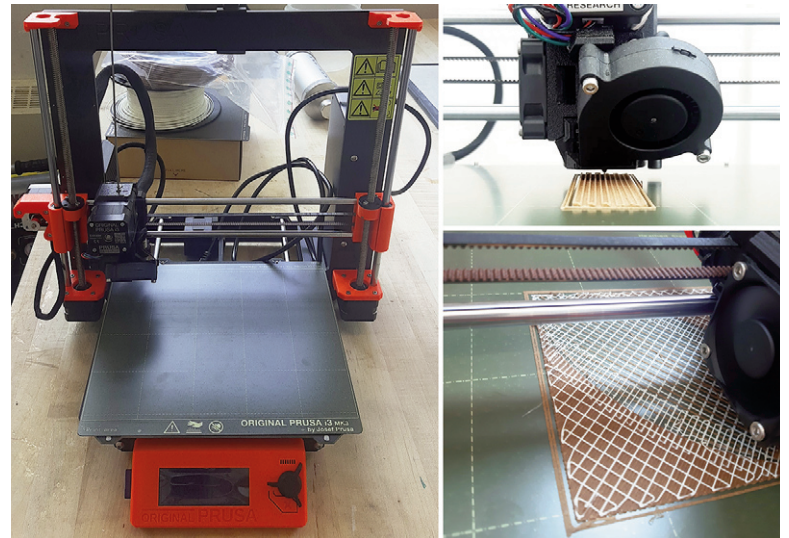
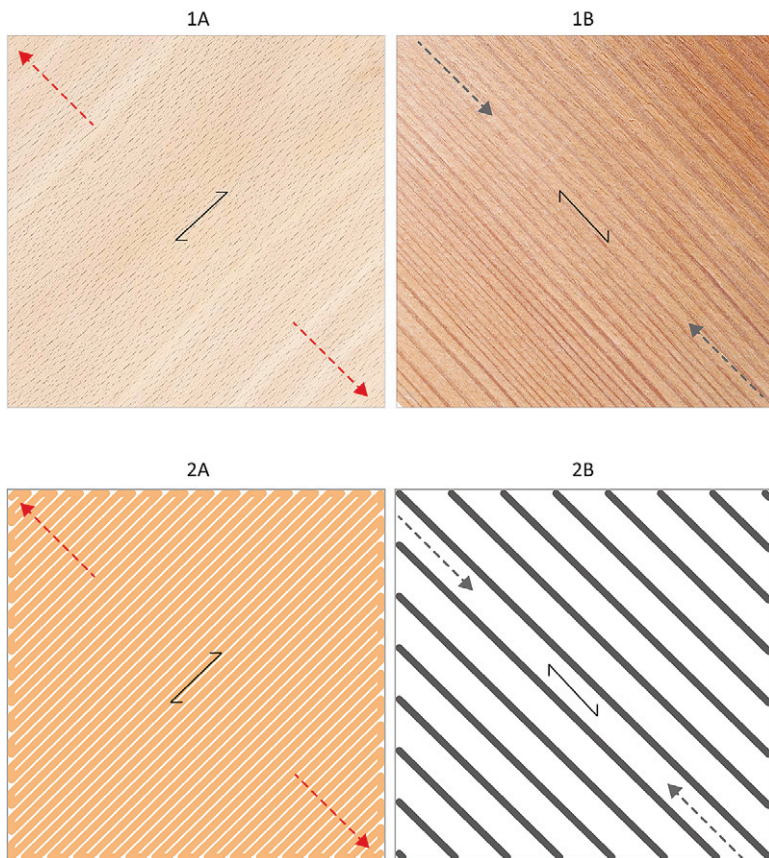
ci, può informare l'osservatore sulle deformazioni igro-responsive che si verificheranno nel composito, fornendo indicazioni sulla relazione tra cambiamento di forma e tempo. Questo tipo di armonia nell'organizzazione dei materiali si trova comunemente in natura e viene pertanto ricercata anche nel design bio-ispirato (Fratzl, 2007).

La ricerca presentata sfrutta gli ampi sviluppi della scienza dei materiali, della fabbricazione digitale e della progettazione computazionale, compresa l'intelligenza artificiale e altri processi algoritmici (Bianconi and Filippucci, 2019; Bianconi et alii, 2022). La capacità di pre-programmare il materiale, la forma e il comportamento degli oggetti responsivi può portare allo sviluppo di soluzioni ispirate alla natura e realizzate con materiali di derivazione biologica, integrandole nell'architettura. Poiché uno degli obiettivi dell'architettura è creare spazi di migliore qualità sia dal punto di vista fisiologico che psicologico, l'impiego di strategie biofiliche (Fell, 2010) e di sistemi adattivi che sfruttano l'intelligenza intrinseca dei materiali piuttosto che l'elettronica (soggetta a guasti) può consentire di ottenere questi risultati.

In questo articolo si vuole, da un lato definire il ruolo dell'organizzazione dei materiali secondo pattern modulari che definiscono gli elementi costitutivi della 4DP, dall'altro presentare un esempio concreto di tale approccio progettuale. La relazione tra i moduli funzionali responsivi e la loro influenza nella programmazione delle deformazioni igroscopiche della 4DP è dimostrata attraverso la progettazione e la fabbricazione di un attuttore 4DP realizzato tramite un Composito Polimerico di Legno (WPC): la struttura a forma di fiore è differenziata funzionalmente secondo una simmetria radiale e ogni petalo è progettato con due direzioni di attuazione cinematica, pre-programmate all'interno dell'architettura del materiale. Nelle sezioni successive viene fornita una breve panoramica delle proprietà igroscopiche del legno e dei WPC in relazione alla 4DP e vengono quindi discussi il ruolo dei moduli funzionali nella programmazione del materiale e la loro influenza sulla deformazione a flessione complessiva.

**L'igroscopicità del legno e dei WPC** | L'igroscopicità è la capacità di un materiale di assorbire o cedere acqua da o verso l'ambiente circostante; grazie a queste proprietà il legno è considerato un materiale naturale intelligente (Ugolev, 2014) che subisce variazioni dimensionali in seguito a fluttuazioni di umidità: l'assorbimento di acqua ne provoca il rigonfiamento, mentre una diminuzione dell'Umidità Relativa (UR) fa sì che perda acqua e si restringa. Ogni specie legnosa ha i suoi tipici coefficienti di rigonfiamento e ritiro, ma si può ritenere che le maggiori deformazioni igroscopiche si verifichino sempre lungo la direzione tangenziale, che è ortogonale alla direzione delle fibre (Giordano, 1981; Holstov, Bridgens and Farmer, 2015).

Replicando la struttura a doppio strato che consente la flessione delle squame della pigna (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reichert, Menges and Correa, 2015) è possibile produrre un composito a base di legno che mostri lo stesso comportamento utilizzando un materiale igroscopico come strato attivo e un materiale non igroscopico come strato passivo. Le impiallaccature di legno possono essere laminate incollando i due strati funzionali con direzioni della fibratura ortogonali, otte-



**Fig. 1** | Wood laminate grain direction in the expansion (1A) and constraint layers (1B) is equivalent to 4DP WPC printing direction in both layers (2A, 2B); in both cases, the direction of expansion is perpendicular to the grain / printing direction (credit: G. Pelliccia, 2023).

**Fig. 2** | A Prusa i3 MK3S+ was used for this research, with the Laywood filament as an expansion layer (credit: G. Pelliccia, 2023).

**Fig. 3** | A glass box filled with water at room temperature was used to monitor the bending deformations of the 4DP actuator (credit: G. Pelliccia, 2023).

nendo una deformazione indotta dalla flessione per variazioni di UR (Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati et alii, 2018). Allo stesso modo tali principi possono essere trasferiti alla stampa 3D utilizzando filamenti WPC, composti da una certa quantità di farina di legno che varia tra il 20% e il 40% (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa et alii, 2020), incorporati in un legante polimerico, solitamente Acido Polilattico – PLA (Le Duigou et alii, 2016).

La direzione del percorso di stampa nei WPC 4DP è quindi l'analogo della direzione della fibrazione nei laminati in legno e, pertanto, entrambe sono ortogonali alla direzione di espansione igroscopica (Correa et alii, 2015; Fig. 1). Tuttavia la fabbricazione di attuatori passivi tramite 3DP richiede una progettazione specifica alla scala della mesostruttura, depositando con precisione i percorsi di stampa per definire più strati funzionali e programmando così dei particolari Materiali Funzionalmente Graduati (FGM).

La struttura del legno a livello microscopico è un esempio di come la gradazione funzionale e la modularità possano influenzare direttamente le proprietà meccaniche e il comportamento complessivo del materiale. Ciò è particolarmente evidente negli anelli di crescita annuali, che hanno una composizione variabile in base ai cambiamenti stagionali, con influenze dirette sul coefficiente di

espansione igroscopica e sulle sue proprietà dipendenti dalla direzione (Dinwoodie, 2000). Le ricerche condotte sul legno di abete rosso hanno rivelato, inoltre, che il legno primaticcio presenta lumi ampi e pareti cellulari sottili e che entrambi aumentano gradualmente verso la fine dell'anello di crescita (Lanvermann et alii, 2013).

Allo stesso modo, anche l'Angolo delle Microfibrille (MFA), rispetto all'asse della fibra (Djafari Petroudy, 2017), influenza le caratteristiche del legno e il suo comportamento igroscopico: in primo luogo, quando l'angolo delle microfibrille diminuisce aumenta la rigidità della parete cellulare; in secondo luogo, il ritiro longitudinale mostra un aumento altamente non lineare con l'angolo delle microfibrille (Sheng-zuo, Wen-zhong and Xiang-xiang, 2004). Analogamente nella 4DP anche l'angolo dei modelli utilizzati per stampare i vari moduli funzionali ha un'influenza fondamentale sulle proprietà di rigonfiamento / restringimento del composito stampato. Il contenuto di lignina e l'MFA possono quindi essere considerati esempi di parametri modulari del legno che sono stati tradotti in compositi igroscopici di legno a doppio strato e in blocchi di WPC 4DP.

**Il ruolo del modulo nella 4DP con WPC** | Il campione presentato è stato fabbricato utilizzando

Laywoo-D3 – un WPC commerciale composto dal 40% di farina di legno (strato di espansione) – e PLA per lo strato di vincolo. I filamenti sono stati stampati utilizzando una Prusa i3 MK3S+ con un ugello di 0,4 mm di diametro, secondo la metodologia del gruppo di ricerca di Correa (Correa and Menges, 2015; Correa et alii, 2020) e sono stati successivamente monitorati in immersione (Figg. 2, 3).

Tre diversi strati con caratteristiche specifiche, considerati moduli funzionali, vengono utilizzati per realizzare l'architettura del materiale desiderata: il modulo di espansione è definito da un Raster Pattern (RP) a zig-zag in cui le linee vengono stampate in prossimità le une con le altre; per il modulo di vincolo si utilizza un RP a griglia, costituito da una serie di linee in due direzioni ortogonali la cui distanza (cioè, la densità della griglia) può essere regolata e ruotata secondo l'orientamento desiderato (ad esempio, parallela alla direzione principale o ruotata di 45°). Infine è necessario un modulo legante per migliorare l'adesione tra i moduli di espansione e di vincolo (Tahouni et alii, 2020; Correa, 2022) basato su griglie sfalsate che danno luogo a una trama interconnessa, garantendo che entrambi i materiali abbiano più punti di contatto. Lo scopo è aumentare l'efficacia dell'incollaggio tra Laywood e PLA: a

tal fine il modulo di legame viene stampato con Laywood sopra il modulo di vincolo; aderendo al Laywood sottostante negli spazi vuoti tra la griglia di PLA, quest'ultima risulta bloccata tra il modulo di vincolo e quello di espansione (Fig. 4).

I moduli funzionali possono essere stampati con configurazione verso l'alto o verso il basso. Il modulo di espansione viene stampato con configurazione verso l'alto prima che il modulo di vincolo venga sovrastampato mentre, nella configurazione verso il basso, l'ordine è invertito, con il risultato di uno spessore inferiore della griglia di PLA, che viene schiacciata sul letto di stampa. Quando il Laywood è a diretto contatto con il letto di stampa le linee RP sono più uniformi, grazie alla struttura liscia e regolare della piastra, e più grandi, a causa della pressione dell'ugello contro di esso, mentre il lato esterno del Laywood rimane più strutturato e presenta una maggiore porosità, che migliora e accelera l'assorbimento dell'acqua (Fig. 5).

La manipolazione puntuale del percorso di stampa è fondamentale per disegnare l'architettura della mesostruttura ed è quindi necessario sviluppare un algoritmo di visual scripting in Grasshopper per la progettazione e la programmazione del materiale 4DP che consente di personalizzare quelle proprietà di stampa capaci di influenzare la deformazione igroscopica finale fornendo un controllo discreto su ciascuna di esse (Fig. 6).

#### Pattern modulari e deformazioni dipendenti dal tempo

Sulla base dei materiali, delle attrezzature disponibili, della metodologia di fabbricazione e dei principi 4DP descritti è stato stampato un attuatore WPC a cinque bracci (Fig. 7). Analogamente a quanto riportato nella letteratura precedente sulla 4DP (Gladman et alii, 2016; Poppinga et alii, 2020), la forma a fiore è stata scelta per l'elevato rapporto di forma dei petali, una delle principali caratteristiche geometriche che influenzano sulla reattività: più una dimensione è lunga rispetto all'altra maggiore sarà la curvatura. I cinque bracci sono stati stampati con moduli funzionali alternati per ottenere concavità opposte durante la deformazione igroscopica. Inoltre ogni petalo è stato diviso in due parti uguali: quella interna è stata stampata utilizzando la configurazione verso l'alto, mentre quella esterna con la configurazione verso il basso (Fig. 8).

Il modulo di espansione è stampato in WPC, la cui espansione igroscopica è vincolata dal modulo in PLA. Pertanto dopo l'immersione in acqua, mentre il WPC inizia a espandersi ortogonalmente alla direzione del percorso di stampa, il posizionamento della griglia di PLA su un lato o sull'altro del composito determina la concavità dell'oggetto deformato. Mentre il Laywood si espande, si sviluppano tensioni di compressione sul lato del PLA, che è molto meno igroscopico e mantiene le sue dimensioni originali; la concavità del composito a doppio strato cambia così a seconda del lato sul quale viene stampato il modulo di vincolo (Fig. 9).

L'attuatore descritto è quindi stato posizionato sott'acqua nel suo stato piano e indeformato, raggiungendo la saturazione e la configurazione deformata finale dopo 60 minuti (Fig. 10). La valutazione del comportamento responsivo è stata condotta monitorando i movimenti igroscopici attraverso un video realizzato con una fotocamera fissa (Fig. 11) acquisendo una foto ogni 60 secondi per valutare

non solo la curvatura finale complessiva, ma anche la velocità di curvatura (Fig. 12).

**Risultati e discussione** | L'uso della stampa FDM 4D ha permesso di ottenere un controllo preciso sull'architettura del materiale e sul suo comportamento di cambiamento di forma. Attraverso la deposizione controllata del materiale è stato possibile creare dei moduli che hanno agito come blocchi di costruzione per progettare le proprietà dinamiche di cambiamento di forma, in risposta all'umidità, dell'attuatore. Le istruzioni per ogni modulo sono state pre-programmate nel materiale attraverso il processo di stampa tramite un apposito script in Grasshopper, il quale diventa quindi lo strumento di progettazione che consente un controllo meticoloso del processo di stampa e la gestione della complessa organizzazione dei modelli. Questo accurato livello di controllo è dimostrato dalla capacità di stampare due moduli a doppio strato inversi e complementari senza discontinuità lungo ciascun petalo, tenendo conto della simmetria radiale della geometria del fiore.

Dopo essere stato immerso in acqua per 15 minuti, l'attuatore ha raggiunto circa il 50% della sua curvatura massima, diminuendo poi la velocità di curvatura nei minuti successivi e raggiungendo la saturazione dopo 60 minuti. Questo processo di deformazione può essere considerato veloce rispetto ad attuatori simili analizzati in studi precedenti che invece necessitavano di almeno due ore per completare la fase di assorbimento (Correa, 2022; Bianconi et alii, 2023).

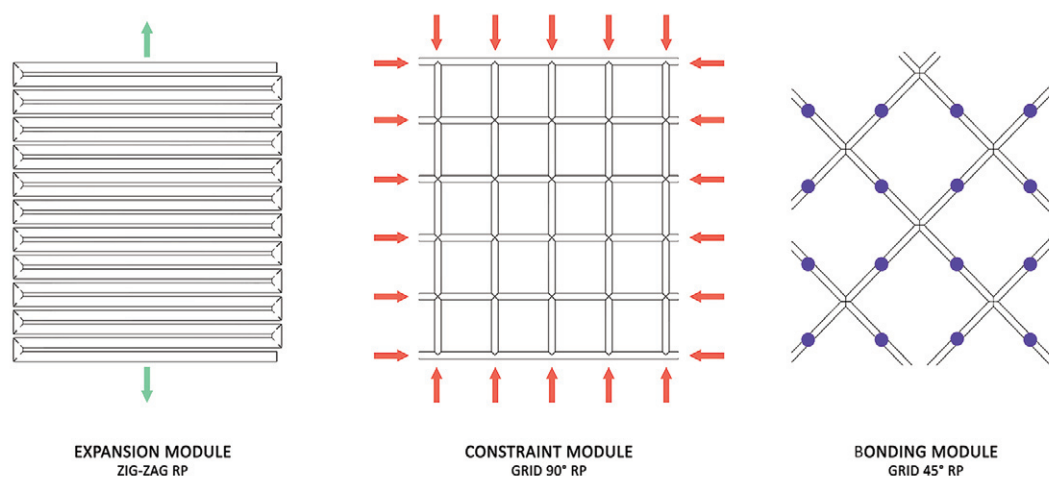
La metà interna dei petali, caratterizzata dalla configurazione verso l'alto, ha mostrato una minore responsività rispetto alla metà esterna con configurazione verso il basso. Ciò è dovuto al diverso rapporto di forma, poiché la punta della metà esterna è vincolata solo dal modulo di vincolo in PLA e può quindi piegarsi, beneficiando della sua forma affusolata, mentre la metà interna

è collegata al centro fisso dell'attuatore e ha, quindi, un rapporto di forma inferiore che produce una flessione minore rispetto alla punta del petalo. Inoltre nella metà interna si produce una doppia curvatura, dal momento che il centro fisso influenza anche sulla curvatura indotta dalla struttura a doppio strato, che diminuisce progressivamente verso la metà esterna del petalo che, essendo vincolata solo dal modulo di vincolo in PLA, mostra una curvatura singola.

Rispetto ad altre tecnologie di fabbricazione i metodi presentati beneficiano di attrezzature e materiali a basso costo; tuttavia le applicazioni di tali meccanismi in architettura presentano ancora alcune limitazioni: i WPC 4DP mostrano una maggiore responsività quando vengono immersi in acqua piuttosto che in risposta alle sole variazioni di umidità relativa (Le Duigou et alii, 2020); inoltre, quando si introducono nuovi approcci e tecnologie si possono incontrare possibili barriere culturali e sociali: gli utenti e gli architetti potrebbero sentirsi incerti su tecnologie non consolidate in termini di estetica, prestazioni, manutenzione, longevità e costi operativi complessivi.

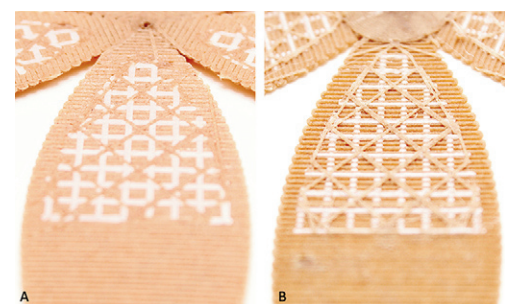
Affrontare queste sfide richiederà una collaborazione interdisciplinare, capace di coinvolgere architetti, ingegneri, chimici, produttori e altre parti interessate; parallelamente formazione, ricerca e progetti dimostrativi potranno aiutare a superare queste sfide e a promuovere l'adozione dei compositi polimerici di legno stampati in 4D e igro-responsivi nel settore delle costruzioni.

**Conclusioni** | La ricerca presentata in questo articolo ha indagato e sperimentato l'applicazione innovativa della stampa FDM 4D per lo sviluppo di attuatori a cambiamento di forma complessi attraverso la manipolazione della geometria del materiale. Questo studio si colloca nel contesto più ampio della ricerca sul legno e sui suoi compositi in architettura, sfruttando i progressi della scienza



**Fig. 4** | Different raster patterns were used for the various functional modules: the zig-zag RP optimizes the expansion of Laywood orthogonally to the print direction, the grid 90° RP ensures an effective constraint to the hygro-expansion of Laywood, and the grid 45° allows to bond together Laywood and PLA through multiple contact points (credit: G. Pelliccia, 2023).

**Fig. 5** | The direct contact of Laywood with the print bed (A) makes the surface smoother, while the outer side (B) is textured and porous (credits: G. Pelliccia, 2023).



dei materiali, della fabbricazione digitale e della progettazione computazionale: combinando questi elementi, il lavoro presentato contribuisce a una maggiore consapevolezza degli attuatori igro-responsive 4DP a base di legno in architettura e del loro potenziale per migliorare la qualità dell'ambiente interno.

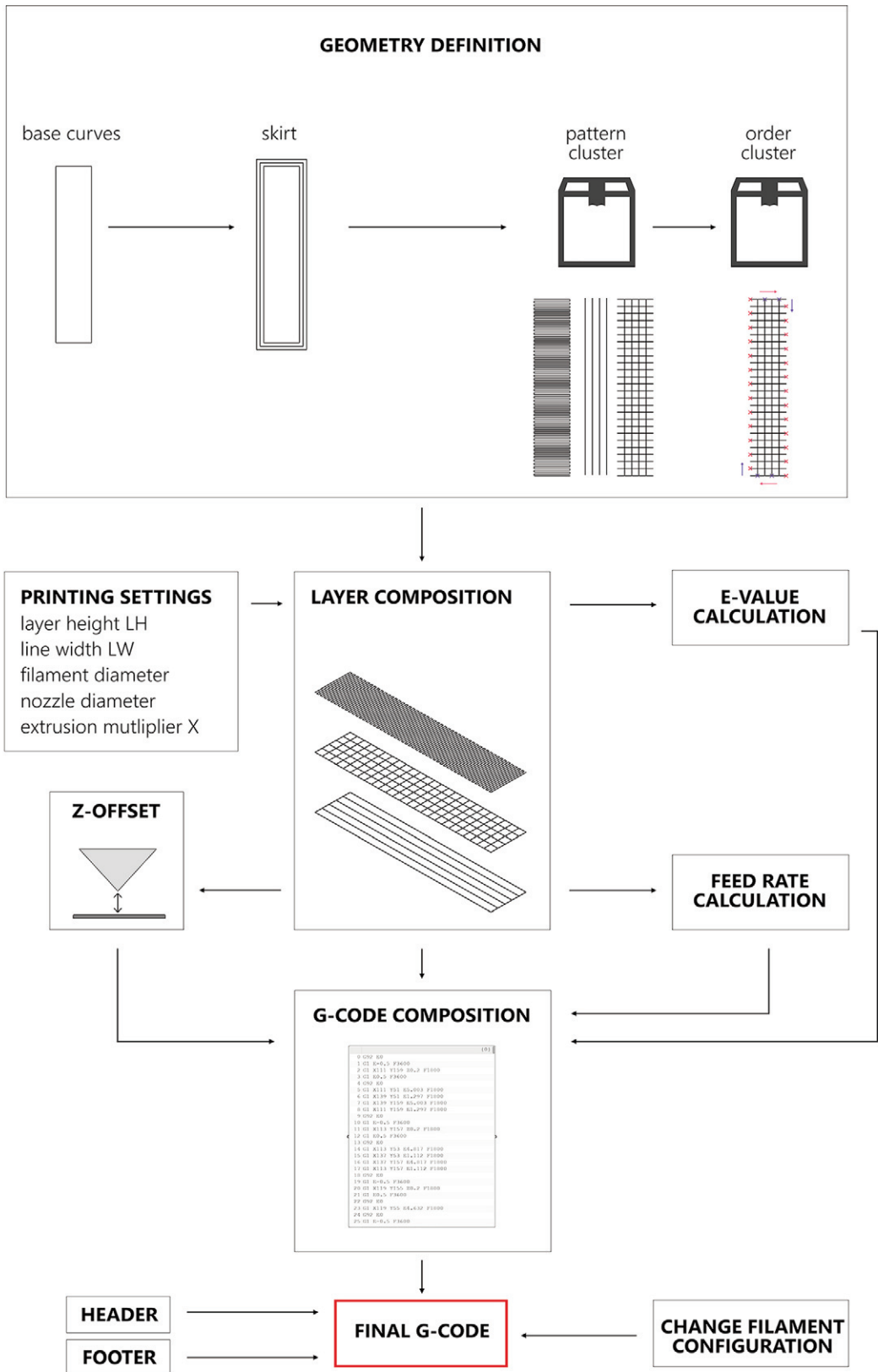
In questo articolo viene inoltre illustrata la capacità della stampa 4D con WPC di creare meccanismi responsivi con proprietà specifiche. L'approccio modulare alla progettazione di un materiale, ispirato alla natura e guidato da un controllo

preciso dei parametri di stampa, può portare a futuri progressi nello sviluppo di materiali dinamici e adattivi con applicazioni nell'architettura e nel design: ad esempio attraverso elementi e componenti per le facciate degli edifici e regolatori passivi del flusso luminoso o della ventilazione, finalizzati a migliorare l'efficienza energetica e le prestazioni senza bisogno di input elettromeccanici.

Oltre alle prestazioni tecniche i sistemi responsivi a variazione di forma di elevata complessità geometrica possono migliorare significativamente la qualità estetica degli spazi nelle applicazioni edi-

lizie, influenzando positivamente sulla percezione degli occupanti. Rispondendo ai cambiamenti ambientali in tempo reale questi sistemi possono inoltre avere un impatto sociale significativo restituendo 'visivamente' cambiamenti altrimenti invisibili nella qualità dell'aria interna, come variazioni di temperatura e umidità.

Il concetto di ilemorfismo di Aristotele, che sottolinea la relazione intrinseca tra materia e forma, è stato rivisitato in questo studio nel contesto della stampa 4D. L'architettura dei materiali svolge un ruolo cruciale nella progettazione di compositi adattivi e i pattern utilizzati nella stampa 4DP agiscono come un linguaggio che informa gli osservatori sulle deformazioni igro-responsive nel composito, fornendo essenzialmente informazioni sulla relazione tra il cambiamento di forma e il tempo e tra il clima e il tempo. Questo approccio modulare alla progettazione dei materiali si ispira alle strategie naturali di progettazione gerarchica e mira a raggiungere l'armonia, la simmetria e le proporzioni nella progettazione dei compositi tecnici.



Bio-inspired studies look at nature to find technical solutions for a multitude of research questions. From architecture to soft robotics and medicine (Poppinga et alii, 2020), the research must also look at fabrication technologies that can support the translation of those bio-inspired principles into functional applications. 3D Printing (3DP) is being increasingly used for such purposes and, thanks to a wide variety of applications (Khosravani and Reinicke, 2020) and its customizability, it is also suitable to be used in unconventional ways. Unlike ordinary industrial processes of casting, extrusion or milling, the fabrication of biological inspired materials requires the careful choreography of material architectures at multiple length scales. Through 3DP, Functionally Graded Composite Materials (FGCMs) can be fabricated, which are advanced engineered materials that exhibit a gradual and controlled variation in composition, structure, or properties over their volume (Udupa, Rao and Gangadharan, 2014). Moreover, 3DP has shown potential in the development of Smart Materials, whose properties change in reaction to external stimuli like light, heat, solvents, electric current or water (Addington and Schodek, 2005; Tibbits, 2013; Mustapha and Metwalli, 2021).

3DP based on Fused Deposition Modelling (FDM) technology is one of the most widely used methods due to its low costs and customizability (Ni et alii, 2017). FDM uses a continuous filament of a thermoplastic polymer that can be repeatedly melted when heated and solidified when cooled. FDM allows for the precise control of printing parameters (temperature, speed, extrusion, and height) and print path organization patterns (shell, infill, and printing direction) that result in the definition of direction-dependent mechanical characteristics in the resulting part (Ahn et alii, 2002).

By intentionally defining the relation of this material organization characteristics across layers, the FDM process directly enables the design of the

Fig. 6 | Workflow diagram illustrating the dedicated Grasshopper script developed to customize WPC 4D printing (credit: G. Pelliccia, 2023).

material's meso-architecture (Tahouni et alii, 2021). This unique characteristic has been particularly suitable for developing 3DP composites with tailored 4D shape-change behavior that is achieved through their programmable material architectures (Correa, 2022). Such shape-change kinematics, being time-dependent, take the name of 4D Printing (4DP), since the fourth dimension of time is accounted for the transformation (Tibbits, 2013). 4DP actuators are capable of shape-transformation in response to multiple stimuli such as heat (Ge et alii, 2014), relative humidity changes in the air (Le Duigou et alii, 2019; Tomec et alii, 2021), or direct contact with water during submersion (Shiblee et alii, 2019; Le Duigou et alii, 2020).

The design of 4DP actuators is done through the reiteration of material organization modules. These modules function as building blocks at different hierarchical scales and are responsible for the resulting 4DP behavior in response to a target stimulus (Le Duigou and Correa, 2022). The material organization modules start with the print path lines, which create direction-dependent raster patterns. These 3DP patterns characterize the material architecture of the composite, dictate its mechanical properties, and regulate the passive reaction to moisture variations.

At a second hierarchical level, the specific design of these raster patterns is used to define the meso-scale architecture of the bilayer structure. At this scale, two main functional layers, with differentiated and highly anisotropic raster patterns, are defined in relation to each other: a moisture-responsive expansion layer, and a non-responsive constraint layer. The expansion layer is hygroscopic and is responsible for the dimensional variations of the composites by absorbing and desorbing moisture; the constraint layer has much lower hygroscopic coefficients instead. The bilayer design builds on known relations for bi-metals as developed by Timoshenko (1925). 4D shape-change transformations are then designed by geometrically defining direction-dependent properties for each layer that will direct the time-dependent hygroscopic expansion into a pre-determined shape (Correa and Menges, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Le Duigou et alii, 2016; Vailati et alii, 2018; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021).

A unique connection between matter and form is presented through the 4DP method that extends beyond previous work done with bilayers fabricated via lamination methods. Material properties result from discrete formal modules, the print paths, that are uniquely organized across various meso-scales to achieve large 4DP shape-change transformations at the macro-scale. According to Aristotle's definition of hylomorphism, every physical object is composed of matter and form: form defines how a substance is organized or structured and, therefore, gives matter its identity. Matter and form are to be considered as one; they are not two independent objects or two independent parts of a whole (Witt, 1987).

Therefore, by working within Aristotle's conceptual framework, the possibility of achieving a precise form is always inherent in matter. However, as technologies and materials evolved, other factors have been introduced and 4DP defines a new relationship between form and matter. The responsive printed objects' geometric configura-

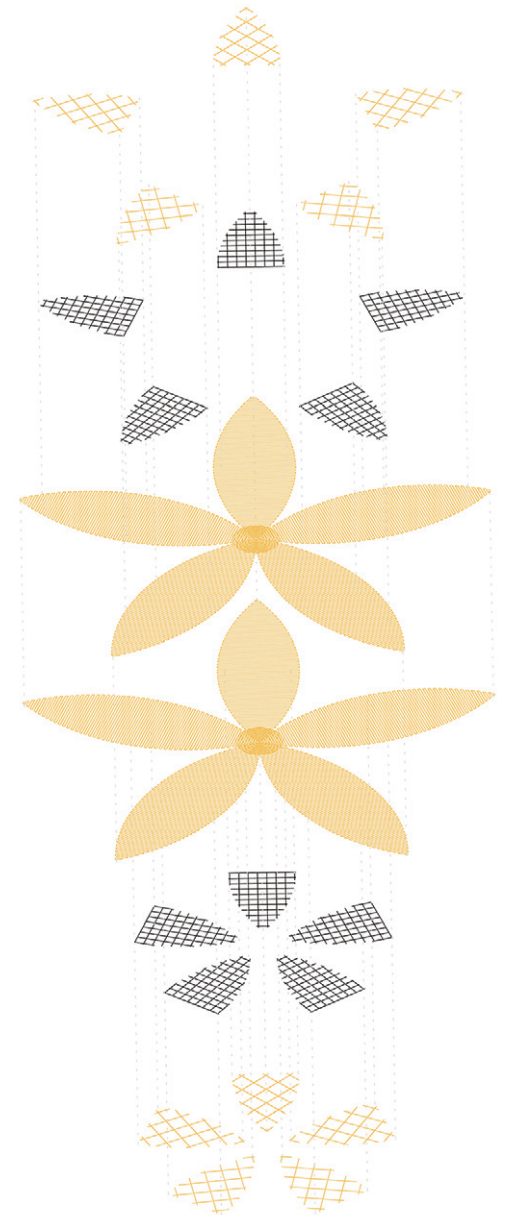
tions depend not only on the materials themselves but also on the hierarchical and formal organization of the precisely designed material architecture. While it is difficult to assert what Aristotle exactly meant in regard to the relation of matter and form, it is unlikely that he considered the active nature of 4DP composites, where shape is constantly changing in relation to environmental conditions and the passage of time.

In the design of 4DP composites, print paths are building blocks used to define a material language. A language, therefore, requires patterns and rules that can maintain order and support the creation of meaning. In 4DP, meaning could be interpreted as the clarity in the design intent, resulting in measurable performance characteristics, such as precise definition of target shape change, curvature amplitude or faster shape-change response time. Patterns within the material architecture are, therefore, the essential elements constituting that language, which, through the various geometric patterns, can inform the observer regarding the hygro-responsive deformations that are going to occur in the composite, giving information about the relationship between shape change and time. This type of harmony in material organization is commonly found in nature and sought after in bio-inspired design (Fratzl, 2007).

The presented research takes advantage of extensive developments on material science, digital fabrication and computational design, including Artificial Intelligence and other algorithmic processes (Bianconi and Filippucci, 2019; Bianconi et alii, 2022). The ability to pre-program responsive objects' material, shape, and behavior can develop bio-based and bio-inspired solutions integrated in architecture. Architecture aims to create improved quality spaces from both a physiological and a psychological point of view; through biophilic strategies (Fell, 2010) and adaptive systems that use the embedded material intelligence rather than failure-prone electronics such results can be achieved.

In this paper, we aim to position the role of the material organization as modular patterns that form the building blocks of 4DP while offering an example of said design approach. The relationship between functional responsive modules and their influence in programming 4DP hygroscopic deformations is demonstrated here through the design and fabrication of a Wood Polymer Composite (WPC) 4DP actuator: the flower-like structure is functionally differentiated using radial symmetry, and each petal is designed with two directions of kinematic actuation that are pre-programmed within its material architecture. The paper provides a short overview of the hygroscopic properties of wood and WPCs in relation to 4DP: the role of functional modules in material programming is then discussed, and their influence on the overall bending deformation is argued. The paper ends by discussing the main results and conclusions.

**Hygroscopicity of wood and WPCs** | Hygroscopicity is the ability of a material to adsorb / desorb water from the surrounding environment. Thanks to such properties, wood is considered a natural smart material (Ugolev, 2014), which undergoes dimensional variations following humidity fluctuations. The absorption of water results in wood



**Fig. 7** | Exploded axonometric view of the functional modules composing the actuator: from the bottom: bonding, constraint, expansion, expansion, constraint, bonding (credit: G. Pelliccia, 2023).

swelling, while a decreasing relative humidity (RH) will cause wood to lose water and shrink. Every wood species has its typical swelling and shrinking coefficients, but it can be considered that the highest hygroscopic deformations always occur along the tangential direction, which is orthogonal to the grain direction (Giordano, 1981; Holstov, Bridgens and Farmer, 2015).

By replicating the double-layered structure that enables the bending of pine cone scales (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reichert, Menges and Correa, 2015), a wood-based composite can be fabricated to exhibit the same behavior using a hygroscopic material as the active layer and a non-hygroscopic material as the passive layer. Wood veneers can be laminated by gluing the two functional layers with orthogonal grain directions, resulting in bending-induced deformation for changes in RH (Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati et alii, 2018). Similarly, such principles can be transferred to 3D printing using WPC filaments composed of a certain amount of wood flour that ranges be-

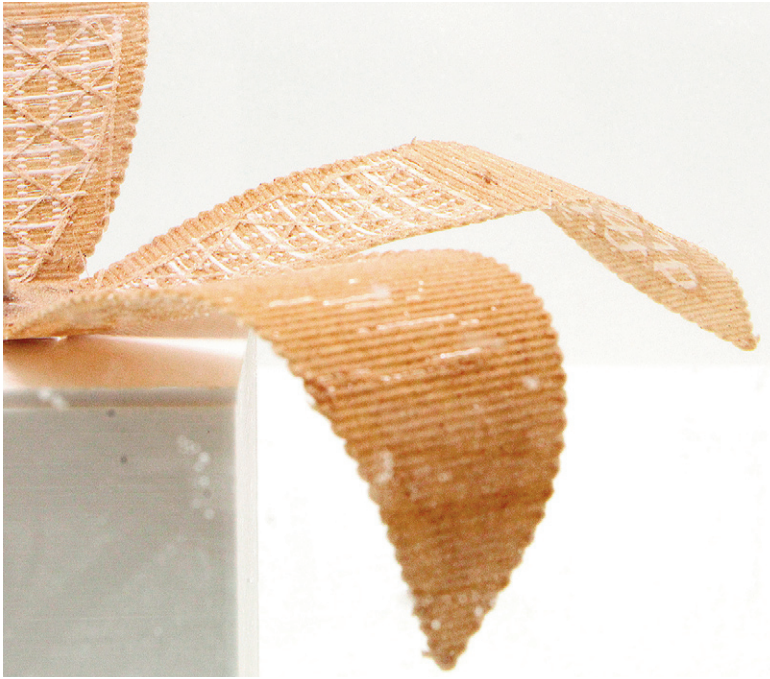


Fig. 8 | Close-up view of the deformed actuator, showing the upward and downward configurations (credit: G. Pelliccia, 2023).

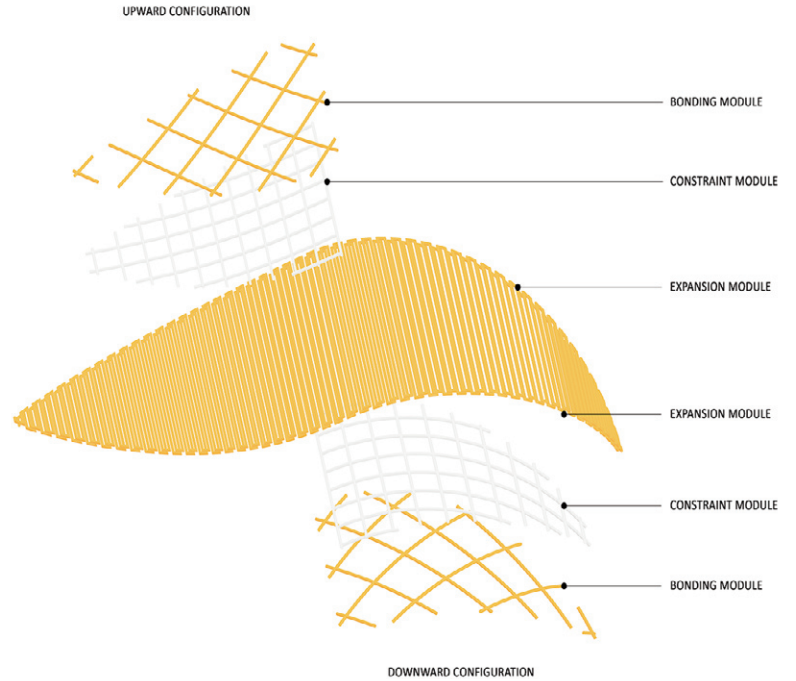


Fig. 9 | The upward and downward configurations influence the concavity during the actuation (credit: G. Pelliccia, 2023).

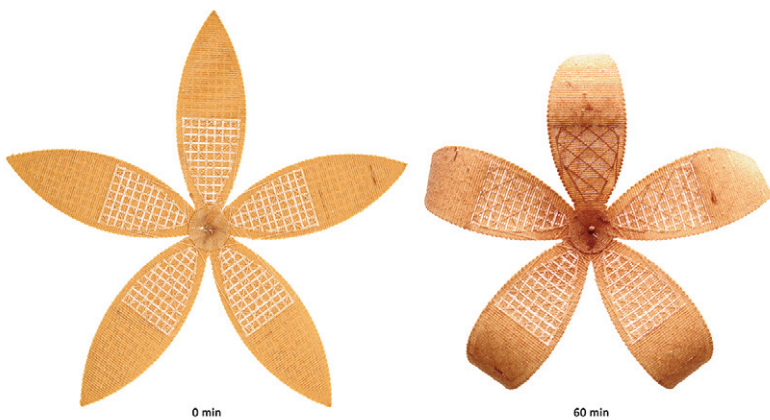


Fig. 10 | Top view of the actuator before being exposed to humidity (0 minutes) and after 60 minutes of immersion (credit: G. Pelliccia, 2023).



Fig. 11 | A fixed camera was positioned in front of the glass box to acquire one photo per minute (credit: G. Pelliccia, 2023).

tween 20% and 40% (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa et alii, 2020) embedded in a polymer binder, usually Polylactic Acid – PLA (Le Duigou et alii, 2016).

The toolpath direction in 4DP WPCs is thus the analogue of the grain direction in wood laminates. Therefore, both are orthogonal to the direction of hygro-expansion (Correa et alii, 2015; Fig. 1). However, the fabrication of passive actuators via 3DP requires precise design at the mesostructure scale by depositing the printing paths to define multiple functional layers and programming particular Functional Graded Materials (FGMs).

Wood structure at the microscopic level is an example of how functional gradation and modularity can directly influence mechanical properties and the overall behavior of the material. This is particularly evident in the annual growth rings, which have a variable composition based on seasonal changes. The yearly growth cycle directly impacts

the coefficient of hygroscopic expansion and its direction-dependent properties (Dinwoodie, 2000).

Research conducted on spruce wood has revealed that earlywood exhibits wide lumens and thin cell walls and that both gradually increase towards the end of the growth ring (Lanvermann et alii, 2013). Similarly, the MicroFibril Angle (MFA) also influences wood characteristics and its hygroscopic behavior; MFA refers to the microfibrils' angle relative to the fiber axis (Djafari Petroudy, 2017). First, as the microfibril angle decreases, the stiffness of the cell wall increases. Second, longitudinal shrinkage exhibits a highly non-linear increase with the microfibril angle (Sheng-zuo, Wenzhong and Xiang-xiang, 2004). Similarly, in 4DP, the angle of the raster patterns used to print the various functional modules also has a key influence on the swelling / shrinking properties of the printed composite. Lignin content and MFA can, therefore, be considered examples of modular pa-

rameters in wood that have been translated into wooden hygroscopic bilayers, first, and into the building blocks of WPC 4DP, second.

**The role of the module in WPC 4DP** | The presented sample was fabricated using Laywoo-D3 – a commercial WPC composed of 40% wood flour (expansion layer) – and PLA for the constraint layer. The filaments were printed using a Prusa i3 MK3S+ with a 0.4 mm nozzle diameter, based on Correa et alii methodology (Correa and Menges, 2015; Correa et alii, 2020) and were successively monitored under water immersion (Fig. 2, 3).

Three different layers with specific characteristics, considered functional modules, are used to fabricate the desired material architecture. The expansion module is defined by a zig-zag Raster Pattern (RP) with close proximity between each print-path line. A grid RP is used for the constraint module, consisting of a series of lines in two or-

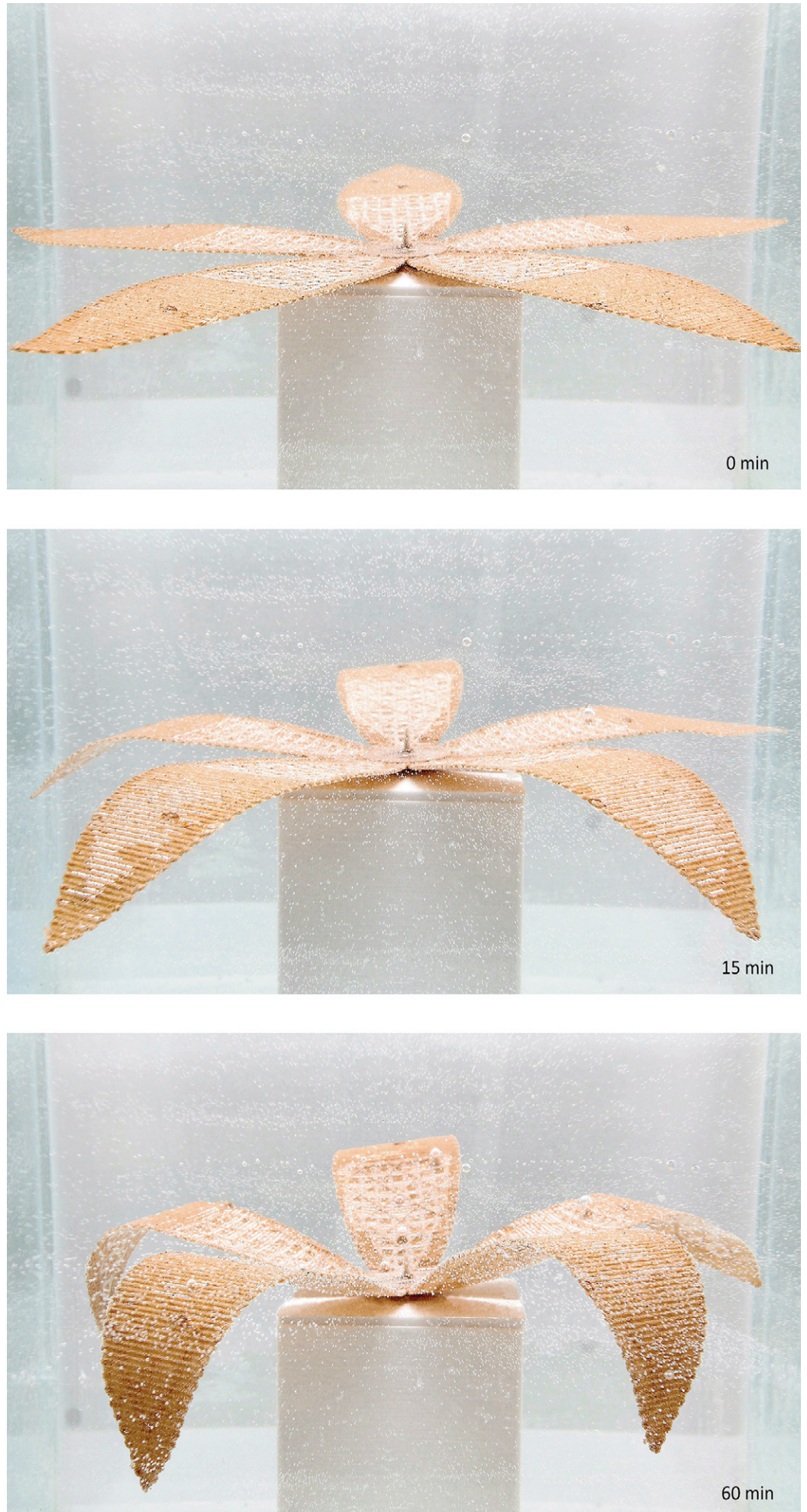
thogonal directions whose line distance (i.e., grid density) can be adjusted. The grid can be rotated according to the desired orientation (i.e. parallel to the main direction or rotated 45°). Last, a bonding module is needed to improve adhesion between expansion and constraint modules (Tahouni et alii, 2020; Correa, 2022). Such module is based on staggered grids, resulting in an interconnected weave pattern that ensures that both materials have multiple points of contact with each other. The purpose is to increase the bonding effectiveness between Laywood and PLA. Therefore, the bonding module is printed using Laywood above the constraint module. By adhering to the underlying Laywood in the gaps between the PLA grid, this last one results in being locked between the bonding module and the expansion one (Fig. 4).

The functional modules can be printed in an upward or downward configuration. The expansion module is printed in an upward configuration before the constraint module is overprinted. In the downward configuration, the order is reversed instead, resulting in a lower thickness of the PLA grid, which is squashed on the build plate. When Laywood is in direct contact with the print bed, the RP lines are smoother, due to the smooth and regular texture of the bed, and larger, due to the pressure of the nozzle against the print bed. Instead, the outer side of the Laywood is more textured and has an increased porosity, which improves and accelerates water absorption (Fig. 5).

A visual scripting algorithm was developed in Grasshopper for the design and material programming of the 4DP material. Precise manipulation of the print path was critical to articulate the mesostructure architecture. The developed script allows for customization of the relevant printing properties that affect the final hygroscopic deformation, giving discrete control over each (Fig. 6).

**Modular patterns and time-dependent deformations** | Based on the described 4DP materials, equipment, fabrication methodology, and principles, a five-arm WPC actuator was printed (Fig. 7). Similar to previous literature in 4DP (Gladman et alii, 2016; Poppinga et alii, 2020), this flower-like shape was chosen due to the high aspect ratio of the petals, which is one of the main geometric features affecting responsiveness: the longer one dimension is compared to the other, the greater the curvature will be. The five arms were printed with alternating functional modules to achieve opposite concavities during hygro-deformation. Furthermore, each petal was divided into two equal parts, of which the inner one was printed using the upward configuration, while the outer one had the downward configuration (Fig. 8).

The expansion module is printed in WPC, whose hygro-expansion is constrained by the PLA module. Therefore, after being immersed in water, the WPC starts swelling orthogonally to the tool-path direction of its zig-zag RP. During such a process, the location of the PLA grid on one side of the bilayer determines the concavity of the deformed shape. While Laywood expands, compression stresses are developed on the PLA side, which is much less hygro-responsive and keeps its original size. Therefore, the concavity of the bilayer changes whether the constraint module is printed on one side or another (Fig. 9). The actuator was positioned underwater in its flat, unde-



**Fig. 12** | Time-lapse frames of the actuation at 0 minutes, 15 minutes, and 60 minutes (credits: G. Pelliccia, 2023).



formed state. After 60 minutes, it reached saturation and achieved its final deformed configuration (Fig. 10). The assessment of the responsive behavior was conducted by monitoring the hygroscopic motions through a fixed camera (Fig. 11). A time-lapse video was created by taking one picture every 60 seconds to evaluate not only the overall final curvature but also the velocity of curvature (Fig. 12).

**Results and discussion** | The use of FDM 4D printing made it possible to achieve precise control over the material architecture and its shape-change behaviour. The precise deposition of material created modules, which acted as the building blocks, to enable the design of unique dynamic shape-change properties in response to moisture. The instructions for each module were pre-programmed into the material through the printing process. A dedicated Grasshopper script becomes the design instrument that allows the accurate control of said printing process by managing the complex organization of patterns. This level of accurate control is demonstrated in the ability to print two inverse and complementary bilayer modules without discontinuities along each petal while accounting for the radial symmetry of the flower-like geometry. After being immersed in water for 15 minutes, the actuator reached around 50% of its maximum curvature. The velocity of curvature then decreased during the following minutes. Saturation was achieved after 60 minutes. This actuation can be considered fast compared to similar actuators investigated in previous studies, which instead needed at least two hours to complete the absorption phase (Correa, 2022; Bianconi et alii, 2023).

The inner half of the petals, characterized by the upward configuration, showed less responsiveness compared to the outer half with the downward configuration. This is due to the different aspect ratio since the tip of the outer half is only constrained by the constraint module and can, therefore, bend, benefiting from its tapered shape. Instead, the inner half is connected to the fixed center of the actuator and, thus, has a lower aspect ratio. This results in a minor bending compared to the tip of the petal. Moreover, the inner half also exhibits a double curvature. Such behavior occurs because the fixed center also constrains the bilayer structure. The double curvature progressively decreases toward the outer half of the petal,

which, being only constrained by the constraint module, shows a single curvature.

Compared to other fabrication technologies, the presented methods benefit from low-cost equipment and materials. However, the applications of such mechanisms in architecture still have some limitations. First, 4DP WPCs show much greater responsiveness when immersed in water rather than in response to relative humidity changes alone (Le Duigou et alii, 2020). Second, possible cultural and social barriers could be encountered when introducing new approaches and technologies. The occupants and architects might feel uncertain about the latest technology in terms of aesthetics, performance, maintenance, longevity and overall operational costs.

Addressing these challenges will require interdisciplinary collaboration, including architects, engineers, manufacturers, policymakers, and other stakeholders. Education, research, and demonstration projects can help overcome these challenges and drive the adoption of 4D printed hygro-responsive wood polymer composites in architecture.

**Conclusions** | The research presented in this paper investigates and positions the innovative application of FDM 4D printing to manipulate form within material to develop complex shape-change actuators. The research is situated within the broader context of wood and wood composite research in architecture, leveraging advancements in material science, digital fabrication, and computational design. By combining these elements, the study contributes towards the greater understanding of wood-based 4DP hygro-responsive actuators in architecture and their potential to improve indoor environmental quality.

This research also illustrates the capacity of WPCs 4D printing to create responsive mechanisms with unique intrinsic properties. The modular approach to material design, informed by nature and guided by precise control over printing parameters, can lead to future advancements in developing dynamic and adaptive materials with applications in architecture and design. For instance, the development of building façade applications and passive indoor airflow controllers with intrinsic response to moisture, relative humidity, or sun radiation. The increased understanding of kinematic design in these mechanisms can contribute to building, automotive or industrial appli-

cations addressing thermal control, ventilation, or shading. The 4DP components can improve energy efficiency while reducing operational costs by improving functional performance without needing external electromechanical input.

In addition to technical performance, responsive shape-change systems of high geometric complexity can significantly improve occupant comfort in building applications through visual delight. Responding to real-time environmental changes, these systems can have a significant social impact by visually representing otherwise invisible changes in indoor air quality, such as temperature and humidity. Serving as both a technical performance component and an educational tool, these 4DP mechanisms offer an integrated approach to sustainable design with a high potential for social impact.

Aristotle's concept of hylomorphism, which emphasizes the intrinsic relationship between matter and form, was revisited in the context of 4D printing. Material architecture plays a crucial role in shaping the design of adaptive composites. The patterns used in 4DP act as a language that informs observers about the hygro-responsive deformations that will occur in the composite, essentially providing information about the relationship between shape change and time and climate and time. This modular approach to material design takes inspiration from natural hierarchical design strategies and aims to achieve harmony, symmetry, and proportion in designing technical composites.

## Acknowledgements

The presented work is part of the PhD research of G. Pelliccia, with the supervision of F. Bianconi, M. Filippucci and D. Correa during the XXXV cycle of the International Doctoral Program in Civil and Environmental Engineering of the University of Perugia, ended with a thesis titled 'Hygroscopic indoor design – Morphological and material programming of responsive wooden bilayers and 4D printing shape-change mechanisms'.

The contribution is the result of a common reflection of the Authors. However, the introductory paragraph is to be attributed to G. Pelliccia, D. Correa, F. Bianconi and M. Filippucci, the paragraph 'Hygroscopicity of wood and WPCs'

to G. Pelliccia and D. Correa, the paragraphs 'The role of the module in WPC 4DP', 'Modular patterns and time-dependent deformations' and 'Results and discussion' to G. Pelliccia, the paragraph 'Conclusions' to D. Correa, F. Bianconi and M. Filippucci.

## References

- Addington, M. and Schodek, D. L. (2005), *Smart materials and new technologies – For the architecture and design professions*, Architectural, Oxford.
- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K. (2002), "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", in *Rapid Prototyping Journal*,

vol. 8, issue 4, pp. 248-257. [Online] Available at: [doi.org/10.1108/13552540210441166](https://doi.org/10.1108/13552540210441166) [Accessed 13 October 2023].

Bianconi, F. and Filippucci, M. (2019), "Wood, CAD and AI – Digital modelling as place of convergence of natural and artificial intelligent to design timber architecture", in Bianconi, F. and Filippucci, M. (eds), *Digital Wood Design – Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, Springer, Cham, pp. 3-60. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_1) [Accessed 13 October 2023].

Bianconi, F., Filippucci, M., Pelliccia, G. and Correa, D. (2023), "Sfruttare l'intelligenza naturale del legno per migliorare la ventilazione passiva degli edifici | Harnessing the natural intelligence of wood to improve passive ventilation

in buildings”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 25, pp. 252-259. [Online] Available at: doi.org/10.36253/teche-13656 [Accessed 13 October 2023].

Bianconi, F., Filippucci, M., Pelliccia, G., Rossi, G., Tocci, T., Tribbiani, G. and Correa, D. (2022), “Low-Cost Depth-Camera – Open-source 3D displacement measurements for 4D printed hygroscopic composites”, in Nüchter, A., Grusenmeyer, P. and Kersten, T. (eds), *7th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 15-16 December 2022, Würzburg, Germany | The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-2/W1-2022, pp. 23-28. [Online] Available at: doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-23-2022 [Accessed 13 October 2023].

Correa, D. (2022), *4D printed hygroscopic programmable material architectures*, University of Stuttgart. [Online] Available at: elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/12393 [Accessed 13 October 2023].

Correa, D. and Menges, A. (2015), “3D printed hygroscopic programmable material systems”, in *Materials Research Society Online Proceedings*, vol. 1800, issue 1, article 4, pp. 24-31. [Online] Available at: doi.org/10.1557/OPL.2015.644 [Accessed 13 October 2023].

Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A. and Tibbits, S. (2015), “3D-Printed Wood – Programming Hygroscopic Material Transformations”, in *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 2, issue 3, pp. 106-116. [Online] Available at: doi.org/10.1089/3dp.2015.0022 [Accessed 13 October 2023].

Correa, D., Poppinga, S., Mylo, M. D., Westermeier, A. S., Bruchmann, B., Menges, A. and Speck, T. (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*, vol. 378, issue 2167, article 20190445, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1098/rsta.2019.0445 [Accessed 13 October 2023].

Dawson, C., Vincent, J. F. V. and Rocca, A.-M. (1997), “How pine cones open”, in *Nature*, vol. 390, issue 6661, p. 668. [Online] Available at: doi.org/10.1038/37745 [Accessed 13 October 2023].

Dinwoodie, J. M. (2000), *Timber – Its nature and behaviour*, CRC Press, London.

Djafari Petroudy, S. R. (2017), “Physical and mechanical properties of natural fibers”, in Fan, M. and Fu, F. (eds), *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, Woodhead Publishing, pp. 59-83. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0 [Accessed 13 October 2023].

El-Dabaa, R. B., Salem, I. and Abdelmohsen, S. (2021), “Digitally Encoded Wood – 4D Printing of Hygroscopic Actuators for Architectural Responsive Skins”, in *ASCAAD 2021 | Architecture in the Age of Disruptive Technologies*, Cairo, pp. 240-252. [Online] Available at: researchgate.net/publication/350071831\_DIGITALLY\_ENCODED\_WOOD\_4D\_Printing\_of\_Hygroscopic\_Actuators\_for\_Architectural\_Responsive\_Skins [Accessed 13 October 2023].

Fell, D. R. (2010), *Wood in the human environment – Restorative properties of wood in the built indoor environment*, PhD Dissertation, University of British Columbia, Vancouver. [Online] Available at: doi.org/10.14288/1.0071305 [Accessed 13 October 2023].

Fratzl, P. (2007), “Biomimetic materials research – What can we really learn from nature’s structural materials?”, in *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 4, issue 15, pp. 637-642. [Online] Available at: doi.org/10.1098/rsif.2007.0218 [Accessed 13 October 2023].

Ge, Q., Dunn, C. K., Qi, H. J. and Dunn, M. L. (2014), “Active origami by 4D printing”, in *Smart Materials and Structures*, vol. 23, issue 9, article 094007, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094007 [Accessed 13 October 2023].

Giordano, G. (1981), *Tecnologia del Legno – La materia prima – vol. 1*, UTET, Torino.

Gladman, A. S., Matsumoto, E. A., Nuzzo, R. G., Mahadevan, L. and Lewis, J. A. (2016), “Biomimetic 4D print-

ing”, in *Nature Materials*, vol. 15, issue 4, pp. 413-418. [Online] Available at: doi.org/10.1038/NMAT4544 [Accessed 13 October 2023].

Holstov, A., Bridgens, B. and Farmer, G. (2015), “Hygroscopic materials for sustainable responsive architecture”, in *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 570-582. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136 [Accessed 13 October 2023].

Khosravani, M. R. and Reinicke, T. (2020), “3D-printed sensors – Current progress and future challenges”, in *Sensors and Actuators A – Physical*, vol. 305, article 111916, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.SNA.2020.111916 [Accessed 13 October 2023].

Langvermann, C., Evans, R., Schmitt, U., Hering, S. and Niemz, P. (2013), “Distribution of structure and lignin within growth rings of Norway spruce”, in *Wood Science and Technology*, vol. 47, issue 3, pp. 627-641. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00226-013-0529-8 [Accessed 13 October 2023].

Le Duigou, A. and Correa, D. (2022), “4D printing of natural fiber composite”, in Bodaghi, M. and Zolfagharian, A. (eds), *Smart Materials in Additive Manufacturing | Volume 1 – 4D Printing Principles and Fabrication Additive Manufacturing Materials and Technologies*, Elsevier, pp. 297-333. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-824082-3.00028-3 [Accessed 13 October 2023].

Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R. and Martin, N. (2016), “3D printing of wood fibre biocomposites – From mechanical to actuation functionality”, in *Materials and Design*, vol. 96, pp. 106-114. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018 [Accessed 13 October 2023].

Le Duigou, A., Chabaud, G., Scarpa, F. and Castro, M. (2019), “Bioinspired Electro-Thermo-Hygro Reversible Shape-Changing Materials by 4D Printing”, in *Advanced Functional Materials*, vol. 29, issue 40, article 1903280, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adfm.201903280 [Accessed 13 October 2023].

Le Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuzaki, R. and Castro, M. (2020), “A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites”, in *Materials and Design*, vol. 194, article 108911, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.108911 [Accessed 13 October 2023].

Mustapha, K. B. and Metwalli, K. M. (2021), “A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites”, in *European Polymer Journal*, vol. 156, article 110591, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2021.110591 [Accessed 13 October 2023].

Ni, Y., Ji, R., Long, K., Bu, T., Chen, K. and Zhuang, S. (2017), “A review of 3D-printed sensors”, in *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 52, issue 7, pp. 623-652. [Online] Available at: doi.org/10.1080/05704928.2017.1287082 [Accessed 13 October 2023].

Poppinga, S., Correa, D., Bruchmann, B., Menges, A. and Speck, T. (2020), “Plant movements as concept generators for the development of biomimetic compliant mechanisms”, in *Integrative and Comparative Biology*, vol. 60, issue 4, pp. 886-895. [Online] Available at: doi.org/10.1093/icb/icaa028 [Accessed 13 October 2023].

Reichert, S., Menges, A. and Correa, D. (2015), “Metosensitive architecture – Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness”, in *Computer-Aided Design*, vol. 60, pp. 50-69. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.CAD.2014.02.010 [Accessed 13 October 2023].

Rüggeberg, M. and Burgert, I. (2015), “Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications”, in *PLoS ONE*, vol. 10, issue 4, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pone.0120718 [Accessed 13 October 2023].

Sheng-zuo, F., Wen-zhong, Y. and Xiang-xiang, F. (2004), “Variation of microfibril angle and its correlation to wood properties in poplars”, in *Journal of Forestry Research*, vol. 15, issue 4, pp. 261-267. [Online] Available at: doi.org/10.1007/bf02844949 [Accessed 13 October 2023].

Shiblee, M. N. I., Ahmed, K., Kawakami, M. and Furukawa, H. (2019), “4D Printing of Shape-Memory Hydro-

gels for Soft-Robotic Functions”, in Ansell, M. P. (ed.), *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, issue 8, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1002/admt.201900071 [Accessed 13 October 2023].

Spear, M. J., Eder, A. and Carus, M. (2015), “Wood polymer composites”, in *Wood Composites*, pp. 195-249. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.0010-X [Accessed 13 October 2023].

Tahouni, Y., Cheng, T., Wood, D., Sachse, R., Thierer, R., Bischoff, M. and Menges, A. (2020), “Self-shaping Curved Folding – A 4D-printing method for fabrication of self-folding curved crease structures”, in Whiting, E., Hart, J., Sung, C., Peek, N., Akbarzadeh, M., Aukes, D., Schulz, A., Taylor, H. and Kim, J. (eds), *Proceedings SCF 2020 – ACM Symposium on Computational Fabrication, Machinery*, New York, article 5, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1145/3424630.3425416 [Accessed 13 October 2023].

Tahouni, Y., Krüger, F., Poppinga, S., Wood, D., Pfaff, M., Rühle, J., Speck, T. and Menges, A. (2021), “Programming sequential motion steps in 4D-printed hygromorphs by architected mesostructure and differential hygro-responsiveness”, in *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 16, issue 5, article 055002, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-3190/ac0c8e [Accessed 13 October 2023].

Tibbits, S. (2013), “The emergence of 4D printing”, in *TED conference*. [Online] Available at: youtube.com/watch?v=0gMCZFHv9v8 [Accessed 13 October 2023].

Timoshenko, S. (1925), “Analysis of Bi-Metal Thermostats”, in *JOSA | Journal of Optical Society of America*, vol. 11, issue 3, pp. 233-255. [Online] Available at: doi.org/10.1364/JOSA.11.000233 [Accessed 13 October 2023].

Tomec, D. K., Straže, A., Haider, A. and Kariž, M. (2021), “Hygroscopic Response Dynamics of 3D-Printed Wood-PLA Composite Bilayer Actuators”, in *Polymers*, vol. 13, issue 19, article 3209, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/POLYM13193209 [Accessed 13 October 2023].

Udupa, G., Rao, S. S. and Gangadharan, K. V. (2014), “Functionally Graded Composite Materials – An Overview”, in *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 1291-1299. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.442 [Accessed 13 October 2023].

Ugolev, B. N. (2014), “Wood as a natural smart material”, in *Wood Science and Technology*, vol. 48, issue 3, pp. 553-568. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00226-013-0611-2 [Accessed 13 October 2023].

Vailati, C., Bachtar, E., Hass, P., Burgert, I. and Rüggeberg, M. (2018), “An autonomous shading system based on coupled wood bilayer elements”, in *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1013-1022. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.10.042 [Accessed 13 October 2023].

Witt, C. (1987), “Hylomorphism in Aristotle”, in *The Journal of Philosophy*, vol. 84, issue 11, pp. 673-679. [Online] Available at: doi.org/10.5840/jphil1987841116 [Accessed 13 October 2023].