

Fabio Bianconi¹, <https://orcid.org/0000-0001-6639-0302>
Marco Filippucci¹, <https://orcid.org/0000-0002-1821-5080>
Giulia Pelliccia¹, <https://orcid.org/0000-0001-8800-9090>
David Correa², <https://orcid.org/0000-0002-4399-7897>

fabio.bianconi@unipg.it
marco.filippucci@unipg.it
giulia.pelliccia@outlook.it
david.correa@uwaterloo.ca

¹ Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Italia

² University of Waterloo, School of Architecture, Canada

Abstract. Il legno equilibra il suo contenuto di umidità rispetto all'ambiente circostante. Le applicazioni tecniche che sfruttano questa caratteristica possono avere un grande impatto sul miglioramento del comfort igrometrico di ambienti interni ma finora le applicazioni che l'hanno sfruttata sono limitate. L'intelligenza naturale igroscopica del legno può portare allo sviluppo di una nuova tecnologia in grado di migliorare il comfort interno. Il materiale naturale può essere ingegnerizzato in compositi responsivi fatti di scarti di legno e trasformati attraverso la stampa 4D. Gli attuatori biomimetici studiati in questa ricerca mirano a collegare la trasformazione della forma in funzionalità di controllo ambientale applicata al comfort degli edifici tramite soluzioni adattive e passive.

Parole chiave: Compositi in legno; Stampa 4D; Regolazione igrometrica; Controllo passivo; Attuatori responsivi.

Introduzione

Bassa energia incorporata, basso consumo energetico durante il funzionamento e basso impatto ambientale sono caratteristiche prestazionali critiche per le nuove applicazioni tecniche. Questa esigenza ha portato allo sviluppo e alla ricerca di soluzioni in grado di agire sulle problematiche ambientali in modo sempre più intelligente, autonomo e basato su dati rilevati in tempo reale da sensori. Nei sensori naturali il comportamento è totalmente passivo e i movimenti sono guidati da stimoli specifici, come accade ad esempio durante l'espansione e la contrazione passiva del tessuto igroscopico in seguito a variazioni dell'umidità ambientale (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Elbaum and Abraham, 2014; Elbaum, 2018; Correa *et al.*, 2020). Lo studio dei principi biologici che governano questi comportamenti al fine di ricavare modelli per risolvere problemi o trova-

Harnessing the natural intelligence of wood to improve passive ventilation in buildings

Abstract. Wood actively equalises its moisture content in relation to its surrounding environment. Technical applications that can harness this characteristic can have a great impact in the improvement of indoor hygroscopic comfort. So far few applications have made use of this unique property. The natural hygroscopic intelligence of wood can lead to the development of a new technology capable of ensuring improved indoor comfort. The natural material can thus be engineered by creating responsive composites made from wood waste and transformed through 4D printing. The biomimetic actuators studied in this paper are aimed at linking the transformation of form into environmental control functionality applied to building comfort in adaptive and passive solutions.

Keywords: Wooden composites; 4D printing; Hygrometric regulation; Passive control; Responsive actuators.

re soluzioni è chiamato biomimetica (Benyus, 1997; Vincent *et al.*, 2006). Questo approccio mira a creare sensori biomimetici ingegnerizzati attraverso lo studio e l'astrazione di principi da modelli biologici che possono essere successivamente utilizzati per applicazioni tecniche. (Stroble *et al.*, 2009). Negli ultimi 10 anni, l'uso della stampa 3D ha dimostrato un potenziale nello sviluppo di materiali con architetture complesse attraverso la produzione di materiali intelligenti (Mustapha and Metwalli, 2021). La versatilità della manifattura additiva basata sulla tecnologia FDM (*Fused Deposition Modelling*) l'ha resa adatta anche alla realizzazione di sensori di vario tipo e all'impiego in svariati campi (Khosravani and Reinicke, 2020). Il tempo di risposta di un sensore rispetto allo stimolo e la velocità di risposta successiva sono fondamentali per valutare le sue caratteristiche di prestazione. Si parla di stampa 4D (Pei, 2014), un metodo di stampa 3D che è stato utilizzato per produrre sensori la cui reazione è innescata da specifici stimoli esterni come luce, calore, solventi, elettricità o acqua (Tibbits, 2013; Zolfagharian *et al.*, 2016). Tra questi *Stimulus Responsive Materials* (SRMs) (Tibbits, 2013) ci sono quelli che reagiscono alle variazioni di umidità utilizzando filamenti a base di farina di legno (Zuluaga and Menges, 2015; Le Duigou *et al.*, 2016; Tahouni *et al.*, 2020; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021), fibre continue di materiali igroscopici come il lino (Le Duigou *et al.*, 2021), filamenti a base di cellulosa (Wang *et al.*, 2018; Langhansl *et al.*, 2021), o inchiostri idrogel compositi (Sydney Gladman *et al.*,

Introduction

Low embodied energy, low energy consumption during operation and low environmental impact are critical performance characteristics for new technical applications. This requirement has led to the development and search for solutions capable of acting on environmental issues in an increasingly intelligent and autonomous manner, based on real-time sensed data. Natural sensors have a totally passive behaviour and their movements are driven by specific stimuli as happens for instance during passive expansion and shrinkage of hygroscopic tissue after changes in ambient humidity (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Elbaum and Abraham, 2014; Elbaum, 2018; Correa *et al.*, 2020). The study of the biological principles that govern these behaviours in order to derive models to solve problems or

find solutions is called biomimicry (Benyus, 1997; Vincent *et al.*, 2006). This approach aims to create engineered biomimetic sensors through the study and abstraction of principles from biological role models that can be later used for technical applications (Stroble, Stone and Watkins, 2009). Over the past 10 years, the use of 3D printing has demonstrated potential in the development of materials with complex architectures through the production of smart materials (Mustapha and Metwalli, 2021). The versatility of additive manufacturing based on FDM (*Fused Deposition Modelling*) technology has also made it suitable for making sensors of various types and for use in a variety of fields (Khosravani and Reinicke, 2020). How long a sensor takes to respond to a stimulus and how quickly it responds thereafter is critical to assess its performance

2016). L'obiettivo del presente articolo è quello di analizzare le possibili soluzioni responsive realizzate con la tecnologia FDM che, reagendo in modo naturale ai cambiamenti dell'umidità ambientale, potrebbero potenzialmente diventare un fattore chiave per migliorare il comfort e il benessere degli occupanti. L'investimento iniziale nella progettazione e nell'ingegnerizzazione di questi compositi potrebbe produrre benefici a lungo termine, in quanto non presentano componenti elettronici soggetti a guasti e sono indipendenti da fonti di alimentazione esterne. Il comportamento adattivo di questi elementi dipende strettamente dall'architettura dei materiali, che può essere progettata, programmata e simulata attraverso strumenti di progettazione computazionale e *visual scripting* e fabbricata direttamente tramite stampa 3D.

Il trasferimento dei principi biomimetici dal legno ai compositi stampati in 3D

della fibratura del legno (tangenziale, longitudinale e radiale) (Giordano, 1981). Queste considerazioni hanno portato diversi gruppi di ricerca a cercare di amplificare le caratteristiche di deformazione del legno, generalmente considerate un difetto del materiale, attraverso la produzione di compositi responsivi (Reichert, Menges and Correa, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati *et al.*, 2018). In particolare, trasferendo i principi biomimetici che regolano l'apertura delle squame delle pigne a strutture artificiali ingegnerizzate, è possibile realizzare strutture a doppio strato con una risposta pre-programmata alle va-

Il legno è un materiale anisotropo con simmetria ortotropica che presenta tre diversi coefficienti di rigonfiamento che corrispondono all'orientamento

della fibratura del legno (tangenziale, longitudinale e radiale) (Giordano, 1981). Queste considerazioni hanno portato diversi gruppi di ricerca a cercare di amplificare le caratteristiche di deformazione del legno, generalmente considerate un difetto del materiale, attraverso la produzione di compositi responsivi (Reichert, Menges and Correa, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati *et al.*, 2018). In particolare, trasferendo i principi biomimetici che regolano l'apertura delle squame delle pigne a strutture artificiali ingegnerizzate, è possibile realizzare strutture a doppio strato con una risposta pre-programmata alle va-

characteristics. Referred to as 4D printing (Pei, 2014), this method of 3D printing has been used to produce sensors, whose reaction is triggered by specific external stimuli, such as light, heat, solvents, electricity or water (Tibbits, 2013; Zolfagharian *et al.*, 2016). These Stimulus Responsive Materials (SRMs) (Tibbits, 2013) include those which react to changes in humidity by using wood flour-based filaments (Zuluaga and Menges, 2015; Le Duigou *et al.*, 2016; Tahouni *et al.*, 2020; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021), continuous fibres of hygroscopic materials, such as flax (Le Duigou *et al.*, 2021), cellulose-based filaments (Wang *et al.*, 2018; Langhansl *et al.*, 2021), or composite hydrogel inks (Sydney Gladman *et al.*, 2016).

The objective of this paper is to investigate possible responsive solutions

made through FDM technology that, by reacting naturally to changes in ambient humidity, could potentially become a key contributor in occupant comfort and well-being. However, the initial investment in design and engineering of said composites could yield long-term benefits as they do not feature failure prone electronic components and are independent of external power sources. The adaptive behaviour of such elements strictly depends on their material architecture, which can be designed, programmed and simulated through computational design tools and visual scripting, and directly fabricated via 3D printing.

Biomimetic transfer from wood to 3D printed composites

Wood is an anisotropic material with orthotropic symmetry that has three

riazioni di umidità (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reyssat and Mahadevan, 2009; Reichert, Menges and Correa, 2015). Le differenze nel coefficiente di espansione tra i due strati determinano la flessione del composito indotta dalle sollecitazioni (Le Duigou and Correa 2022). È stato dimostrato che la teoria di Timoshenko (Timoshenko, 1925) per le strisce bimetalliche può essere applicata anche ai *bilayer* igroscopici, sostituendo la temperatura con l'umidità relativa e i coefficienti di espansione termica con i coefficienti igroscopici (Reyssat and Mahadevan, 2009). La risposta dei compositi a doppio strato responsivi all'umidità può anche essere pre-programmata in modo che si trovino in uno stato indeformato per uno specifico valore di umidità relativa, ad esempio il 40%, e inizino a deformarsi per valori superiori o inferiori (Pelliccia *et al.*, 2020).

La stampa 3D è stata utilizzata di recente per fabbricare *bilayers* multi-materiale utilizzando filamenti di materiali compositi di legno e polimeri *Wood Polymer Composites* (WPC) (Correa *et al.* 2015; Correa Zuluaga and Menges 2015; Le Duigou and Correa 2022). I WPCs disponibili in commercio contengono tra il 20% e il 40% di farina di legno in una matrice polimerica, solitamente PLA (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa *et al.*, 2020) in modo che il filamento termoplastico possa essere estruso da una stampante 3D FDM (Kariz *et al.*, 2018). La tecnologia FDM consente di personalizzare la direzione di espansione delle fibre, cosa impossibile da ottenere con la fibratura del legno. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla possibilità di realizzare il composito tramite un singolo processo di fabbricazione in cui vengono, in un'unica stampa, realizzati lo strato attivo, quello passivo ed eventuali altri strati funzionali. L'utilizzo di simili attuatori igro-responsive in ambienti indoor può miglio-

different coefficients of swelling, which correspond to the wood grain orientation (tangential, longitudinal and radial) (Giordano, 1981). These considerations have led various research groups to amplify the shape deformation characteristics of wood, generally considered a material defect, through the production of responsive composites (Reichert, Menges and Correa, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati *et al.*, 2018). In particular, by transferring the biomimetic principles that regulate the opening of pine cone scales to engineered artificial structures, it is possible to make bilayer structures with a pre-programmed response to changes in humidity (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reyssat and Mahadevan, 2009; Reichert, Menges and Correa, 2015). The differences in the expansion coefficient between the two layers results in stress-induced bending of

the composite (Le Duigou and Correa 2022). It was proved that Timoshenko's theory (Timoshenko, 1925) for bimetallic strips can also be applied to hygroscopic bilayers by substituting temperature with relative humidity, and thermal expansion coefficients with hygroscopic coefficients (Reyssat and Mahadevan, 2009). The response of hygroscopic responsive bilayer composites can also be pre-programmed so that they are in an undeformed state for a specific relative humidity value, for example 40%, and begin to deform for higher or lower values (Pelliccia *et al.*, 2020).

3D printing has been recently used to fabricate multi-material bilayers using wood polymer composite (WPC) filament material (Correa *et al.* 2015; Correa Zuluaga and Menges 2015; Le Duigou and Correa 2022). Commercially available WPCs contain between

01| Provini rettangolari 20 x 100 mm stampati con materiali, spessori e pattern diversi
Rectangular 20 x 100 mm specimens printed with different materials, thickness and patterns

02| Fotogrammi che mostrano come le proprietà di stampa e il design degli attuatori abbiano un'elevata influenza sul loro comportamento finale
Photograms showing how the printing properties and the design of the actuators have a high influence on their final behavior

rare passivamente le condizioni igrometriche. A tal fine alcune configurazioni di compositi in legno stampati in 4D sono state ideate e realizzate per valutarne il comportamento in condizioni di umidità elevata.

Sperimentazioni: configurazione geometrica, mesostruttura e variazioni morfologiche

Per realizzare gli attuatori descritti in questo articolo è stata utilizzata una stampante Prusa i3 MK3S+ con ugello da 0,4 mm e filamento Laywoo-D3

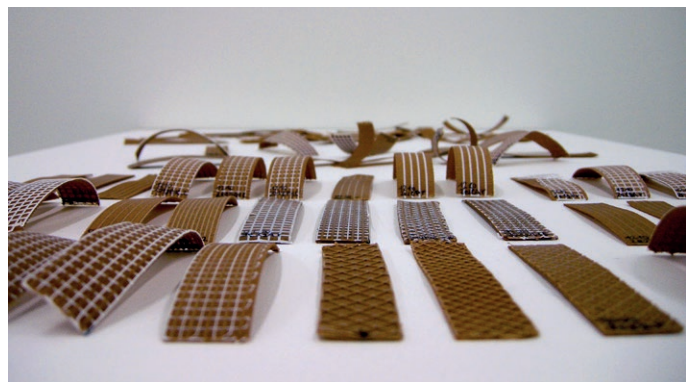
per lo strato attivo, composto al 40% da farina di legno e matrice polimerica PLA. In una prima fase sono stati realizzati dei provini rettangolari (Fig. 1), di 20 x 100 mm, con varie combinazioni di strati, pattern, materiali e spessori, al fine di individuare le soluzioni più responsive dopo l'immersione in acqua (Fig. 2).

Durante questa fase preliminare sono stati individuati i principi base per la programmazione delle specifiche mesostrutture. Ciò ha permesso di realizzare e perfezionare un algoritmo di *visual scripting* in Grasshopper che permette di controllare direttamente le variabili di stampa e il percorso di stampa, le quali avranno un impatto fondamentale sul comportamento finale del composito. L'algoritmo consente di definire un gran numero di parametri, tra cui il numero di strati, lo spessore di ogni parte stampata, il pattern, la temperatura e la velocità di stampa a partire da qualsiasi geometria iniziale (Fig. 3). La totale personalizzazione del processo di progettazione e fabbricazione consente di estendere i principi verificati per i provini rettangolari a forme più complesse.

20% and 40% wood flour in a polymer matrix, usually PLA (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa *et al.*, 2020) so that thermoplastic filament can be extruded by an FDM 3D printer (Kariz *et al.*, 2018). FDM technology allows to customise the grain direction of expansion, which is impossible to achieve with wood grain. A further advantage is represented by the possibility of producing the composite through a single manufacturing process in which, in a single print, the active layer, the passive layer and any other functional layers are made. The use of similar hygro-responsive actuators in indoor environments can passively improve the hygrometric conditions. For that purpose, some configurations of 4D printed wood composites have been designed and fabricated to evaluate their behaviour in high humidity conditions.

Investigations: geometry configuration, mesostructure and morphological variations

A Prusa i3 MK3S+ printer with a 0.4 mm nozzle and Laywoo-D3 filament for the active layer, composed of 40% wood flour and PLA polymer matrix, were used to make the actuators described in this paper. At first, rectangular specimens (Fig. 1), measuring 20 x 100 mm, were made with various combinations of layers, patterns, materials, and thicknesses in order to identify the most responsive solutions after immersion in water (Fig. 2). During this first preliminary phase, the basic principles were identified to programme the specific mesostructures. This allowed to create and adjust a visual scripting algorithm in Grasshopper, which gives direct control over the printing variables and tool path pattern that will have a critical



impact on the final behaviour of the composite. The algorithm allows a large number of parameters to be defined, including the number of layers, thickness of each printed part, pattern, temperature, and printing speed from any initial geometry (Fig.3). The total customisation of the design and fabrication process makes it possible to extend the principles that were verified for the rectangular specimens to more complex shapes.

After the most suitable properties to obtain rectangular geometries with the highest possible velocity of reaction were established, a single curvature actuator was printed, composed of 10 x 100 mm rectangles having an even higher aspect ratio than 20 x 100 rectangles. A specific workflow was then programmed in Grasshopper to print multiple 10 x 100 mm rectangular modules composed of a passive PLA

layer and two Laywoo active layers. All modules were printed simultaneously and connected through a TPU filament woven into the overall structure of the layers to obtain a single actuator (Fig. 4). TPU assumes the role of a third functional layer in addition to the active and passive ones.

To further amplify the overall deformations, a second case study was then created, which consists of a double curvature actuator. This second structure was obtained by coupling, lengthwise, two single curvature actuators, one of which was printed with the layers in reverse order with respect to the other to obtain an opposite concavity after exposure to the stimulus (Fig. 5). The printing order of the layers determines on which side of the composite the constriction imposed by the passive layer acts and, therefore, the direction of the concavity. The result is to have

Una volta stabilito quali sono le proprietà più adatte per ottenere geometrie rettangolari con una velocità di reazione più elevata possibile, è stato stampato un attuttore a singola curvatura composto da rettangoli di 10 x 100 mm che hanno un *aspect ratio* ancora più elevato rispetto ai rettangoli 20 x 100. È stato quindi programmato un workflow specifico in Grasshopper per stampare più moduli rettangolari 10 x 100 mm composti da uno strato passivo in PLA e due strati attivi in Laywood. Tutti i moduli sono stati stampati simultaneamente e collegati attraverso un filamento in TPU intrecciato nella struttura complessiva degli strati per ottenere un singolo attuttore (Fig. 4). Il TPU assume il ruolo di un terzo strato funzionale oltre a quello attivo e quello passivo.

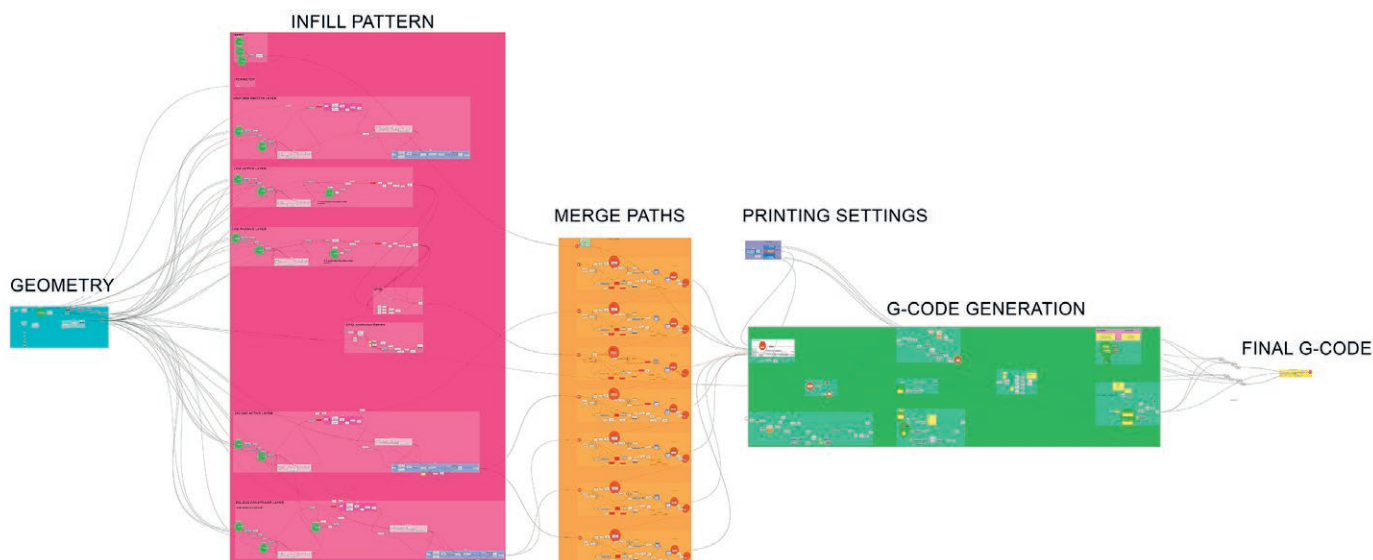
Per amplificare maggiormente le deformazioni complessive è stato poi realizzato un secondo caso studio che consiste in un attuttore a doppia curvatura. Questa seconda struttura è stata ottenuta accoppiando, nel senso della lunghezza, due attuatori a singola curvatura dei quali uno stampato con gli strati in ordine inverso rispetto all'altro per ottenere una concavità opposta dopo l'esposizione allo stimolo (Fig. 5). L'ordine di stampa degli strati determina in quale lato del composito agisce la costrizione imposta dallo strato passivo e, quindi, la direzione della concavità. Il risultato è quello di avere un attuttore a doppia concavità composto da rettangoli 10 x 200 mm che cambiano concavità in corrispondenza dell'asse centrale di simmetria.

Risultati e discussione

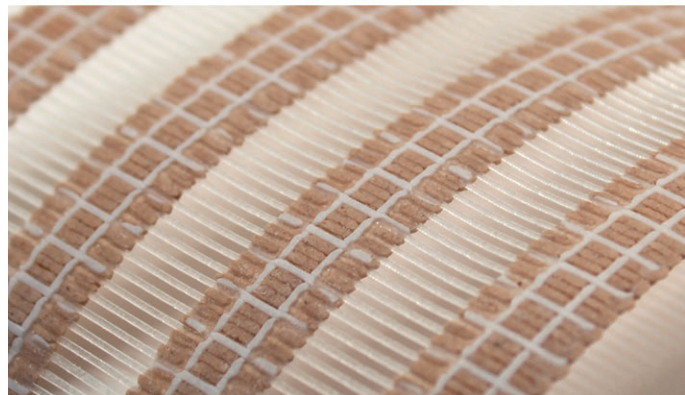
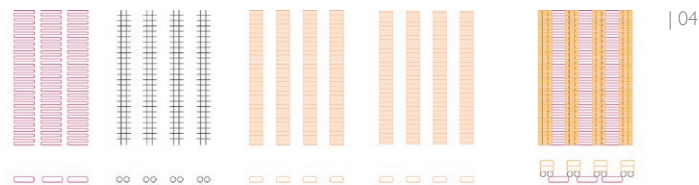
I test iniziali su provini rettangolari 20 x 100 mm hanno fornito indicazioni per regolare la progettazione della mesostruttura per i due attuatori oggetto di studio. Innanzitutto, l'*aspect*

ratio è una delle principali caratteristiche geometriche che influenza la responsività: maggiore è una dimensione rispetto all'altra, maggiore sarà la curvatura. È stato poi osservato che il pattern a zig-zag è il più adatto per lo strato attivo, in quanto consente di enfatizzare l'espansione nella direzione ortogonale a quella del filamento depositato. Ciò comporta un'amplificazione della deformazione complessiva. Per lo strato passivo, sia il PLA che l'ABS sono risultati adatti con pattern lineari o a griglia. Secondo la teoria di Timoshenko, più sottile è lo strato passivo rispetto allo strato attivo, maggiore è l'ampiezza della curvatura. Per avere la massima responsività sono state quindi preferite soluzioni con un singolo strato passivo sottile. Il terzo materiale, il TPU, è stato utilizzato non solo per creare un'unica struttura da più attuatori grazie alla sua capacità di adattarsi elasticamente alla loro curvatura, ma anche per garantire una migliore adesione tra lo strato passivo a griglia in PLA e gli strati attivi.

Lo scopo della ricerca è quello di studiare i compositi 4DP a base di legno per adattarli come meccanismi passivi per facciate igro-responsive. I compositi sono stati quindi stampati il più sottili possibile, in modo che il loro tempo di reazione possa seguire le fluttuazioni giornaliere dell'umidità. Gli attuatori a singola concavità, stampati combinando più moduli di base rettangolari, hanno mostrato un alto livello di cambiamento di forma complessivo. La responsività è infatti uno degli aspetti più rilevanti per creare attuatori in grado di adattarsi rapidamente alle fluttuazioni dell'umidità ambientale. Osservando il comportamento degli attuatori immersi in acqua, l'attuttore a concavità singola impiega circa due ore per raggiungere la massima curvatura, mentre quello a doppia concavità richiede circa

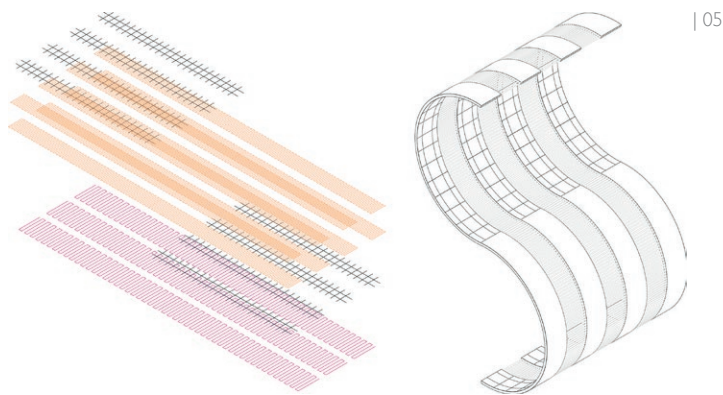


- 04| La mesostruttura dell'attuatore a singola concavità, ottenuto accoppiando rettangoli 10 x 100 mm, mostra la stratificazione dei materiali e dei pattern per ottenere la deformazione desiderata
The mesostructure of the single concavity actuator, made by coupling 10 x 100 mm rectangles, shows how materials and patterns are layered to achieve the desired deformation
- 05| La mesostruttura dell'attuatore a doppia concavità, ottenuto accoppiando nel senso della lunghezza due degli attuatori a singola concavità, è stata concepita per avere un unico attuatore con due concavità opposte
The mesostructure of the double concavity actuator was conceived to have a single actuator with opposite concavity
- 06| Le reazioni all'umidità del primo attuatore a singola concavità (A) e del secondo a doppia concavità (B)
The reactions of the first single concavity actuator (A) and the second double concavity one (B) to humidity



quattro ore per raggiungere una curvatura completa di entrambi i lati (Fig. 6). Ciò può essere dovuto alla maggiore dimensione del secondo attuatore rispetto al primo, che si traduce quindi in un tempo più elevato per completare il ciclo di assorbimento-desorbimento.

I casi di studio sono stati sviluppati per applicazioni indoor, per essere applicati ad esempio come moduli per facciate interne personalizzabili, in cui gli elementi responsivi possono essere aggiunti o rimossi consentendo una maggiore o minore ventilazione (Fig. 7). Gli attuatori si trovano in condizioni di equilibrio e, quindi, nella loro configurazione piatta non deformata, per umidità relative tra il 40% e il 50%. In presenza di variazioni di umidità, gli attuatori reagiscono passivamente curvandosi e consentono di ventilare in maniera naturale l'ambiente. Gli attuatori igroscopici a base di legno hanno un comportamento reversibile che consente loro di portarsi in equilibrio costante con l'ambiente circostante e tornare alla configurazione iniziale per valori di umidità ottimali.



Conclusioni

Le attuali sfide ambientali richiedono lo sviluppo di metodi più sostenibili per migliorare le prestazioni degli edifici. In particolare, riscaldamento, raffreddamento, illuminazione e ventilazione hanno un impatto a lungo termine sull'impronta ecologica

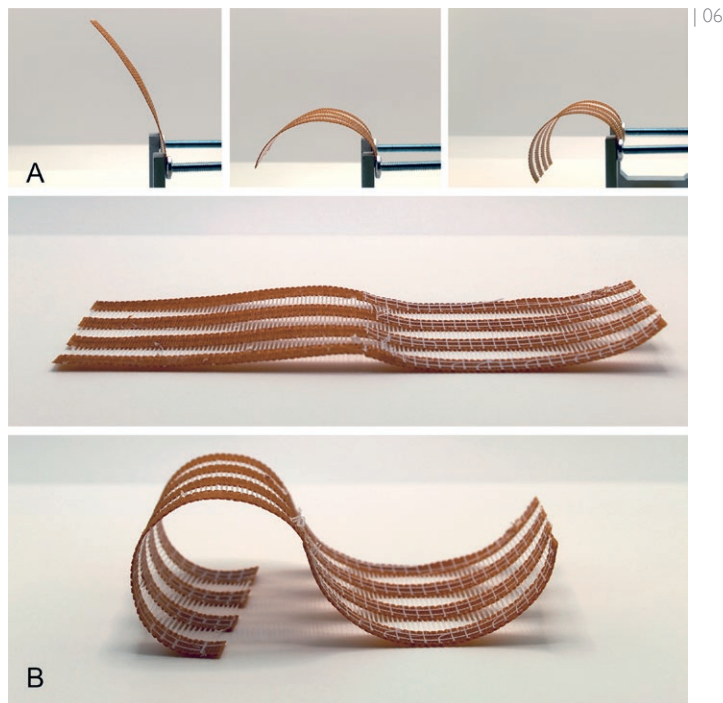
a double curvature actuator composed of 10 x 200 mm rectangles that change concavity in correspondence with the central axis of symmetry.

Results and discussion

Initial tests on rectangular 20 x 100 mm specimens have provided guidance to adjust the mesostructure design of the two studied actuators. First of all, the aspect ratio is one of the main geometric characteristics that influences responsiveness: the longer one dimension is compared to the other, the greater the curvature will be. It was then observed that the zig-zag is the most suitable for the active layer, as it allows to emphasise expansion in the direction orthogonal to that of the deposited filament. This results in an amplification of the overall deformation. For the passive layer, both PLA and ABS were found to be suitable

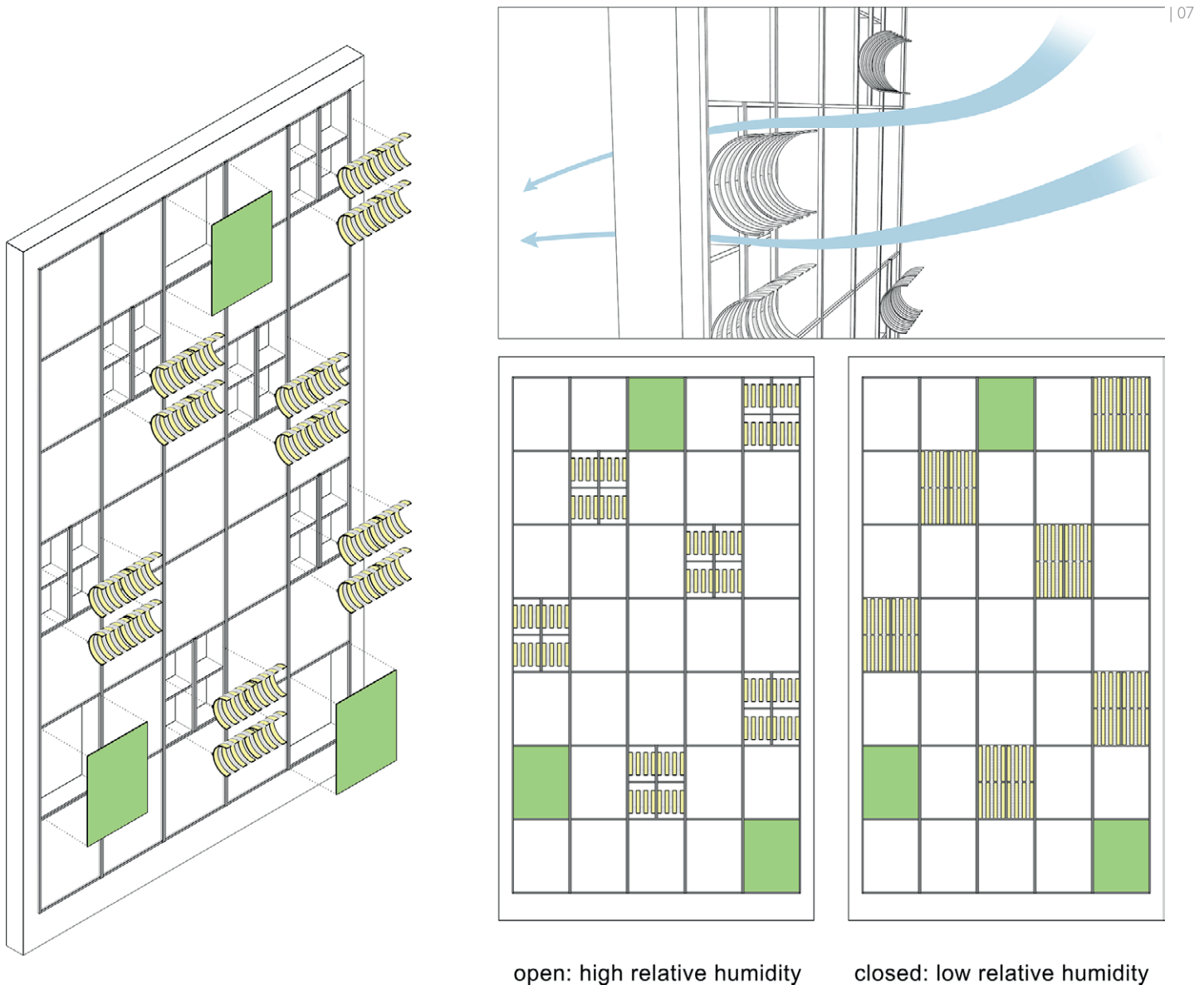
with linear or grid patterns. Following Timoshenko's theory, the thinner the constraint layer relative to the expansion layer, the larger the amplitude of the curvature. Solutions with a thin single constraint layer have, therefore, been preferred in order to have the greatest responsiveness. The third material, TPU, was used here not only to create a single structure from multiple actuators due to its ability of elastically adapt to their curvature, but also to ensure an improved adhesion between the grid PLA constraint layer and the expansion ones.

The aim of the research is to study wood-based 4DP composites to adapt them as passive mechanisms for hygro-responsive façades. The composites were then moulded as thin as possible so that their reaction time could follow daily humidity fluctuations. The single curvature actuators, printed by



gica operativa di un edificio. Questo impatto può essere mitigato adottando strategie passive che non gravano ulteriormente sui consumi e che possono avvalersi di materiali naturali a basso impatto ambientale. In particolare, si sta sempre più diffondendo in vari settori l'impiego di sensori e attuatori intelligenti che possono essere stampati tramite tecnologia FDM. La versatilità della stampa 3D consente infatti di creare sensori biomimetici ingegnerizzati che derivano dall'applicazione di principi da modelli biologici. La programmazione dei materiali tramite attuatori passivi può potenzialmente offrire soluzioni per migliorare gli ambienti

interni, utilizzando materiali rinnovabili a basso costo e costi operativi a lungo termine ridotti. L'architettura degli *Stimulus Responsive Materials* (SRM) può essere programmata attraverso algoritmi di *visual scripting* e stampata in 4D in base allo stimolo e al comportamento desiderato. In questo articolo, i compositi igro-responsivi sono stati fabbricati utilizzando un'architettura funzionale in WPC che applica la teoria di Timoshenko per generare un'attuazione cinematica in risposta agli stimoli ambientali. Il risultato del cambiamento di forma di questi attuatori dipende strettamente dalla geometria iniziale e dalle proprietà di stampa. Combinando diversi strati funzionali tra loro è possibile stam-



pare attuatori la cui reazione all'umidità produce una deformazione significativa. È stato osservato che le soluzioni sviluppate iniziano a flettersi pochi minuti dopo l'esposizione allo stimolo e raggiungono la massima deformazione in poche ore. La differenza di comportamento dipende da vari fattori legati alle proprietà di stampa e a fattori relativi alla forma dell'attuatore. Si cerca, in particolare, di massimizzare non solo la deformazione, ma anche la velocità di risposta. I due attuatori realizzati, uno a concavità singola e l'altro a doppia concavità, hanno raggiunto la massima deformazione in acqua in tempi che vanno dalle due alle quattro ore. Questo comportamento può essere trasferito alla progettazione di facciate responsive che deumidifichino passivamente l'ambiente interno. I meccanismi di apertura/chiusura potrebbero consentire una ventilazione naturale grazie alle sole proprietà intrinseche dei materiali, alla particolare geometria e alla meso-struttura degli attuatori stampati.

La ricerca presentata si configura come un ulteriore passo verso l'applicazione dei compositi igro-responsive all'architettura. I limiti attuali sono da ricercarsi principalmente nei materiali utilizzati che non consentono ancora una totale predicibilità del comportamento a breve e lungo termine. Nelle ricerche future potrebbero essere sperimentate le medesime configurazioni, meccanismi e principi utilizzando materiali igroscopici diversi, in cui i cicli di assorbimento-desorbimento siano totalmente reversibili e la reazione alle variazioni di umidità relativa sia ancora più marcata. Un limite ulteriore è costituito dalla scala attuale degli attuatori, limitata dalle dimensioni delle stampanti 3D utilizzate. Nel futuro potrebbero essere sviluppati degli attuatori a scala maggiore, impiegando stampanti diverse oppure attraverso l'unione di più attuatori.

combining multiple rectangular base modules, showed a high level of overall shape change. Responsivity is, in fact, one of the most important aspects for creating actuators capable of quickly adapting to fluctuations in ambient humidity. Looking at the behaviour of actuators immersed in water, the single concavity actuator takes about two hours to reach full concavity, while the double curvature one takes about four hours to reach full curvature on both sides (Fig. 6). This may be due to the larger size of the second actuator compared to the first, which, therefore, results in a longer time to complete the absorption-desorption cycle.

The case studies have been developed for indoor applications, to be applied for example as modules for customisable indoor façades, where responsive elements can be added or removed, allowing for more or less ventilation

(Fig. 7). The actuators are in equilibrium conditions and, therefore, in their undeformed flat configuration for relative humidity between 40% and 50%. When exposed to humidity variations, the actuators react passively by bending and allow the room to be ventilated naturally. Wood-based hygroscopic actuators have a reversible behaviour that allows them to reach constant equilibrium with the surrounding environment and return to their initial configuration for optimal humidity values.

Conclusion

Current environmental challenges require the development of more sustainable ways of improving building performance. Particularly, heating, cooling, lighting and ventilation loads have a long-term impact in the operational footprint of a building. This

RINGRAZIAMENTI

L'articolo presenta alcuni esiti di un percorso di ricerca intrapreso presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Perugia. In tale percorso si inseriscono un tirocinio curriculare per tesi di laurea presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell'Università degli Studi Firenze e delle borse di studio finanziate dall'impresa di costruzioni in legno Abitare+ di Perugia con il contributo del POR FESR 2014-2020 della Regione Umbria. La ricerca è proseguita con una tesi di dottorato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Perugia con una collaborazione con la School of Architecture della University of Waterloo (Canada).

REFERENCES

- Benyus, J.M. (1997), *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: Harper Perennial.
- Correa, D. et al. (2020), "4D pine scale: Biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 378, p. 2167.
- Dawson, C., Vincent, J.F. V and Rocca, A.M. (1997), "How pine cones open", *Nature*, Vol. 390, n. 6661, p. 668.
- Le Duigou, A. et al. (2016), "3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality", *Materials and Design*, Vol. 96, pp. 106-114, available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>.
- Le Duigou, A. et al. (2021), "4D printing of continuous flax-fibre based shape-changing hygromorph biocomposites: Towards sustainable metamaterials", *Materials & Design*, Vol. 211, p. 110158.
- 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.

impact can be mitigated by adopting passive strategies, which do not further influence energy consumption and which can make use of natural materials with low environmental impact. In particular, the use of intelligent sensors and actuators that can be printed using FDM technology is increasingly spreading in various sectors. The versatility of 3D printing makes it possible to create engineered biomimetic sensors that derive from the application of principles from biological models. Material programming via passive actuators can potentially offer solutions to improve indoor environments while using low cost renewable materials and ensuring low long-term operational costs. The material architecture of specific Stimulus Responsive Materials (SRMs) can be programmed through visual scripting algorithms and 4D printed according

to the desired stimulus and behaviour. In this paper, hygro-responsive composites were fabricated using a functional WPC architecture that applies Timoshenko's theory to generate kinematic actuation in response to weather-related stimulus. The shape-change result of these actuators strictly depends on the initial geometry and printing properties. By combining multiple techniques and modules, it is thus possible to print actuators, whose reaction to humidity produces a significant deformation. It was proven that the developed solutions start bending few minutes after the exposure to the stimulus and reach the maximum deformation in a few hours. The difference in behaviour depends on various factors related to the printing properties and factors associated with the shape of the actuator. In particular, the goal is to maximise not only the defor-

- Elbaum, R. (2018), "Structural principles in the design of hygroscopically moving plant cells", *Plant Biomechanics: From Structure to Function at Multiple Scales*, pp. 235-246.
- Elbaum, R. and Abraham, Y. (2014), "Insights into the microstructures of hygroscopic movement in plant seed dispersal", *Plant Science*, Vol. 223, pp. 124-133.
- Giordano, G. (1981), *Tecnologia del legno. 1, La materia prima*, UTET.
- Kariz, M. *et al.* (2018), "Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts", *Materials Today Communications*, Vol. 14, pp. 135-140.
- Khosravani, M.R. and Reinicke, T. (2020), "3D-printed sensors: Current progress and future challenges", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 305, p. 111916.
- Langhansl, M. *et al.* (2021), "Fabrication of 3D-printed hygromorphs based on different cellulosic fillers", *Functional Composite Materials*, Vol. 2, p. 1.
- Mustapha, K.B. and Metwalli, K.M. (2021), "A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites", *European Polymer Journal*, Vol. 156, p. 110591.
- Pei, E. (2014), "4D printing: Dawn of an emerging technology cycle", *Assembly Automation*, Vol. 34, n. 4, pp. 310-314.
- Pelliccia, G. *et al.* (2020), "Characterisation of wood hygromorphic panels for relative humidity passive control", *Journal of Building Engineering*, Vol. 32, p. 101829.
- Reichert, S., Menges, A. and Correa, D. (2015), "Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness", *Computer-Aided Design*, Vol. 60, pp. 50-69.
- Reyssat, E. and Mahadevan, L. (2009), "Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers", *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 6, n. 39, pp. 951-957.
- Rüggeberg, M. and Burgert, I. (2015), "Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications", *PloS one*, Vol. 10, n. 4, p. e0120718.
- Spear, M.J., Eder, A. and Carus, M. (2015), "Wood polymer composites", *Wood Composites*, pp. 195-249.
- Stroble, J.K., Stone, R.B. and Watkins, S.E. (2009), "An overview of biomimetic sensor technology", *Sensor Review*, Vol. 29, n. 2, pp. 112-119.
- Sydney Gladman, A. *et al.* (2016), "Biomimetic 4D printing", *Nature Materials*, Vol. 15, n. 4, pp. 413-418.
- Tahouni, Y. *et al.* (2020), "Self-shaping Curved Folding: A 4D-printing method for fabrication of self-folding curved crease structures", *SCF 2020 Proceedings: ACM Symposium on Computational Fabrication*, pre-print available at: <https://doi.org/10.1145/3424630.3425416>.
- Tibbits, S. (2013), "The emergence of 4D printing", TED conference.
- Timoshenko, S. (1925), "Analysis of Bi-Metal Thermostats", *JOSA*, Vol. 11, n. 3, pp. 233-255.
- Vailati, C. *et al.* (2018), "An autonomous shading system based on coupled wood bilayer elements", *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 1013-1022.
- Vincent, J.F. *et al.* (2006), "Biomimetics: its practice and theory", *Journal of the Royal Society, Interface*, Vol. 3, n. 9, pp. 471-482.
- Wang, Q. *et al.* (2018), "3D printing with cellulose materials", *Cellulose*, Vol. 25, n. 8, pp. 4275-4301.
- Zolfagharian, A. *et al.* (2016), "Evolution of 3D printed soft actuators", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 250, pp. 258-272.
- Zuluaga, D.C. and Menges, A. (2015), "3D printed hygroscopic programmable material systems", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 1800, pp. 24-31.

mation, but also the speed of reaction. The two studied actuators, one with a single curvature and the other with a double curvature, reached the maximum deformation in water from two to four hours. Such behaviour can be transferred to the design of responsive façades that passively dehumidify the indoor environment. The opening/closing mechanisms could allow natural ventilation thanks only to the inherent properties of the materials, the particular geometry and the meso-structure of the printed actuators. The research presented is configured as a further step towards the application of moisture-responsive composites to architecture. The current limits are mainly to be found in the materials used, which do not as yet allow for total predictability of short and long-term behaviour. In future research, the same configurations, mechanisms and

principles could be tested using different hygroscopic materials in which the absorption-desorption cycles are totally reversible, and the reaction to changes in relative humidity is even stronger. A further limitation is the current scale of the actuators, limited by the size of the 3D printers used. In the future, larger scale actuators could be developed, using different printers or by joining multiple actuators.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper presents some results of a research developed at the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Perugia. This path includes a curricular internship for a master's degree thesis at the Department of Agricultural, Food, Environmental and Forestry Sciences and Technologies of the University of Florence, and scholarships financed

by the wooden construction company of Perugia, Abitare+, with the contribution of the POR FESR 2014-2020 of the Regione Umbria. The research continued with a doctoral thesis at the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Perugia in collaboration with the School of Architecture of the University of Waterloo (Canada).